

Desde la concesión por parte de la Universidad de la Coruña de una beca de colaboración en el departamento de tecnología de la construcción, siendo alumno de cuarto curso, hasta la presentación de esta tesis doctoral, muchas cosas han pasado y no puedo más que escribir una única y sencilla palabra que atañe a todos los miembros del departamento adscritos a la escuela de arquitectura, pero que sin duda quiero dirigir expresamente a Juan B. Pérez Valcárcel. GRACIAS.

A Javier Estévez, director de esta tesis, gracias por tu apoyo, por tantos buenos consejos recibidos y gracias por ver en mi siempre a un amigo.

INDICE

I.- ANTECEDENTES

I.1	Antecedentes de la madera	6
I.2	Antecedentes de las mallas espaciales	31
I.3	Antecedentes de las mallas de madera	39

II.- BARRAS HUECAS DE MADERA

II.1	Diseño de Barras	51
II.2	Estudios Experimentales Previos	55
II.3	Comportamiento de las barras huecas frente al fuego	67
II.4	Diseño de enlace extremo de barra	72
	1ª Propuesta	72
	2ª Propuesta	75
	3ª Propuesta	81
II.5	Diseño y dimensionado de enlace extremo de barra	88
	Diseño del enlace extremo de barra	88
	Dimensionado de los enlaces extremos de barra	90
	Axil de cálculo del enlace	90
	Longitud de ensamble entre maderas	92
	Dimensionado del vástago	94
II.6	Análisis experimental	101
	1ª Campaña. Ensayos de probetas a tracción.	106
	1ª Campaña. Ensayos de probetas a compresión.	117
	2ª Campaña. Ensayos de probetas a tracción.	126
	2ª Campaña. Ensayos de probetas a compresión.	139

III.- NUDO DE ENLACE DE BARRAS

III.1	Diseño del nudo de enlace	152
	Formato DXF	153
	VBA. Active X	154
	Generación paramétrica	156
	Archivo de intercambio IGES	160
III.2	Análisis numérico	162
	Archivo de entrada de datos	165
	Mallado	167
	Tensión equivalente por hipótesis. Nudo 8mm.	169
	Tensión equivalente por hipótesis. Nudo 10mm.	171
	Tensión equivalente por hipótesis. Nudo 12mm.	173

IV.- CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTRUCTURA ESPACIAL

IV.-1	Descripción del proyecto arquitectónico	176
	Documentación gráfica	180
	Modelo Virtual	193
IV.-2	Análisis y dimensionado	197
	Bases de cálculo	197
	Acciones	197
	Propiedades del material	201
	Cálculo de la estructura espacial	204
IV.-3	Ejecución del proyecto	206

V.- CONCLUSIONES. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

V.-1	Antecedentes
V.-2	Conclusiones
V.-3	Nuevas líneas de Investigación

VI.- BIBLIOGRAFÍA

La presente tesis da un paso adelante en la línea de investigación sobre las mallas espaciales constituidas por barras huecas de madera laminada resolviendo aspectos fundamentales de cara a posibilitar su ejecución.

La construcción de la primera malla espacial constituida por barras huecas de madera laminada refleja sin lugar a dudas un hito en el arduo trabajo de investigación iniciado en 1992 por el equipo investigador dirigido por el catedrático Fco. Javier Estévez Cimadevila.

ANTECEDENTES DE LA MADERA

Entre todos los materiales de construcción, la madera destaca por su condición de material natural y renovable. El proceso de transformación de la madera para su utilización en la construcción es muy sencillo y quizás sea el material que menos energía necesita para su transformación de producto natural a producto terminado útil para fines constructivos.

Es uno de los materiales más antiguos que se han utilizado en construcción y su aplicación es muy variada: como estructura, como cerramiento exterior e interior, como carpintería de armar, mobiliario, etc. Las primeras cabañas de madera son refugios constituidos por entramados de ramas colocadas alrededor de un tronco cubiertos con pieles o cañas. Existen hallazgos de restos de estos “materiales de construcción” tanto en Europa [1-1] como en Extremo Oriente, África y las civilizaciones precolombinas de América. En ciertas sociedades nómadas, la madera sigue siendo, hoy en día, el material elegido para la construcción de sus refugios [1-2].



*Ilustración I-1 Ciudad Lacustre de Unteruhldingen.
Alemania. 2200 a.C. reconstruido.*



Ilustración I-2 Vivienda de madera. Mali.

Ya en el año 1500 a.C. los artesanos egipcios, desarrollaron sistemas de encolado de chapas de madera para la elaboración de sarcófagos [1-3]. El comienzo de la utilización de colas orgánicas por los egipcios constituyó un gran avance en el ensamblaje de la madera ya que incrementaba las zonas de contacto, repartiendo los esfuerzos a través de toda la superficie encolada.



Ilustración I-3 Artesanos del Antiguo Egipto.

Pausanias, en su descripción de Grecia realizada entre los años 160-200 a.C., nos aporta datos acerca de la construcción en madera de roble del templo de Apolo en Termos [1-5]; Plinio en su Historia Natural, 23-29 a.C., describe las especies de madera utilizadas para la construcción y la preparación de las colas comunes en la época; asimismo Vitrubio detalla dentro de sus “Diez Libros de Arquitectura”, información gráfica de la disposición estructural del entramado de cubierta de los templos griegos. [1-4, 1-6].

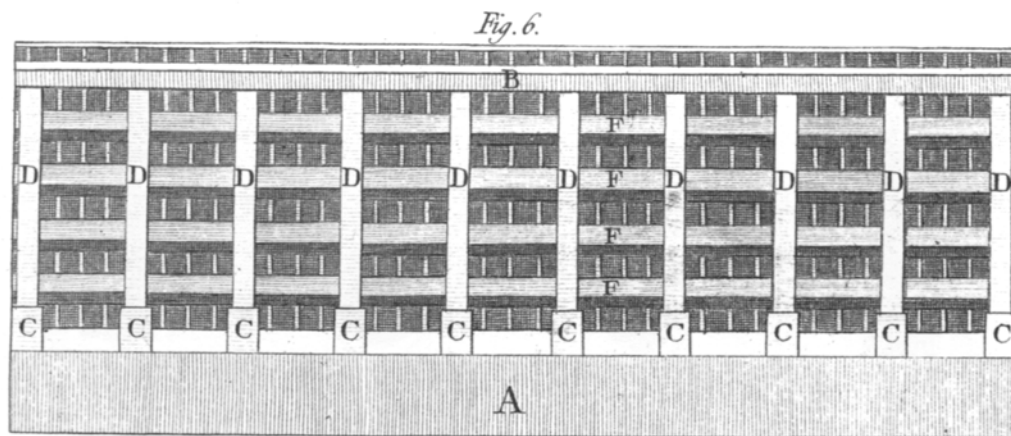
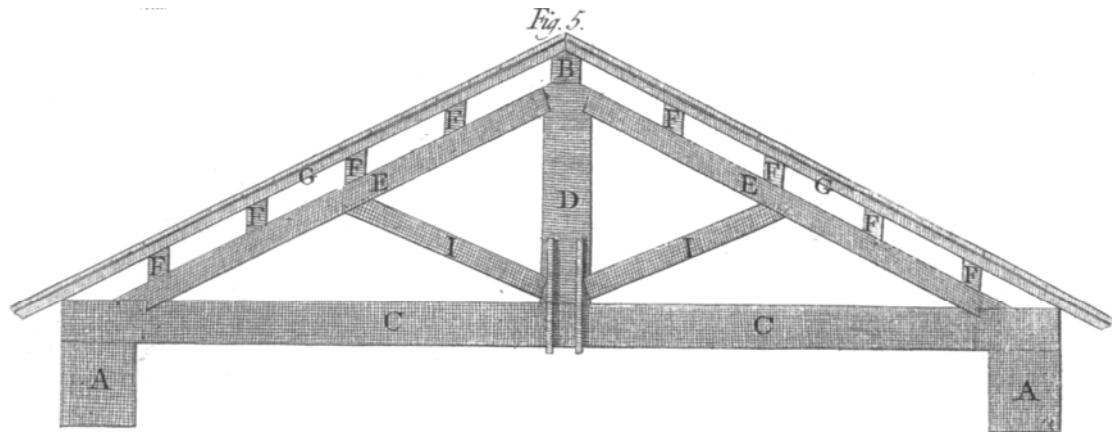


Ilustración I-4 Secciones de un templo griego. Los diez libros de Arquitectura, Cap. II Libro IV. Vitrubio.

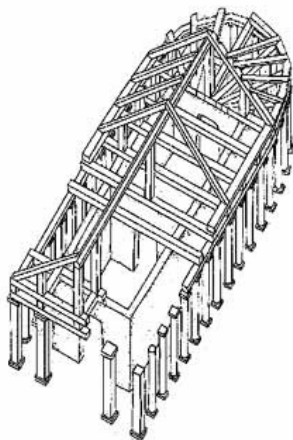


Ilustración I-5. Estructura de cubierta
Templo de Thermos.

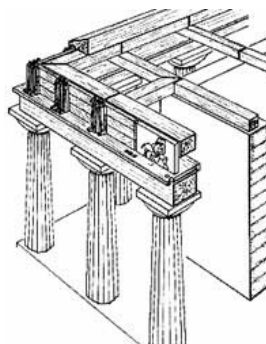


Ilustración I-6. Esquema del entramado de un templo griego
de acuerdo con Vitrubio.

El desarrollo de la construcción en madera a lo largo de la historia ha estado condicionado en gran medida a la evolución de los utensilios de corte y sistemas de transmisión de esfuerzos que, con la aparición de la metalurgia y la incorporación del clavo y el perno, permitió una sustancial mejora de su capacidad resistente. Este desarrollo tecnológico en el uso estructural de la madera se ilustra claramente en la evolución del diseño de los puentes de madera a lo largo del tiempo.



Ilustración I-7 Puente simple de tableros.

Un tronco sobre un río se puede considerar un puente frontera entre lo natural y lo artificial. Del tronco aislado se pasó al tablero de varios troncos adosados: es el puente de vigas simplemente apoyadas. Con el paso del tiempo se construyeron pórticos de jabalcones, arcos de madera, vigas trianguladas, ... [I-7].

Los romanos construyeron puentes de madera sobre los grandes ríos, un buen ejemplo lo constituye el puente sobre el Rhin [I-8] del que conocemos en profundidad sus características gracias a la detallada descripción que realizó Julio Cesar. Está formado por vigas simples apoyadas sobre pórticos transversales, con pilas hincadas en el fondo del río.

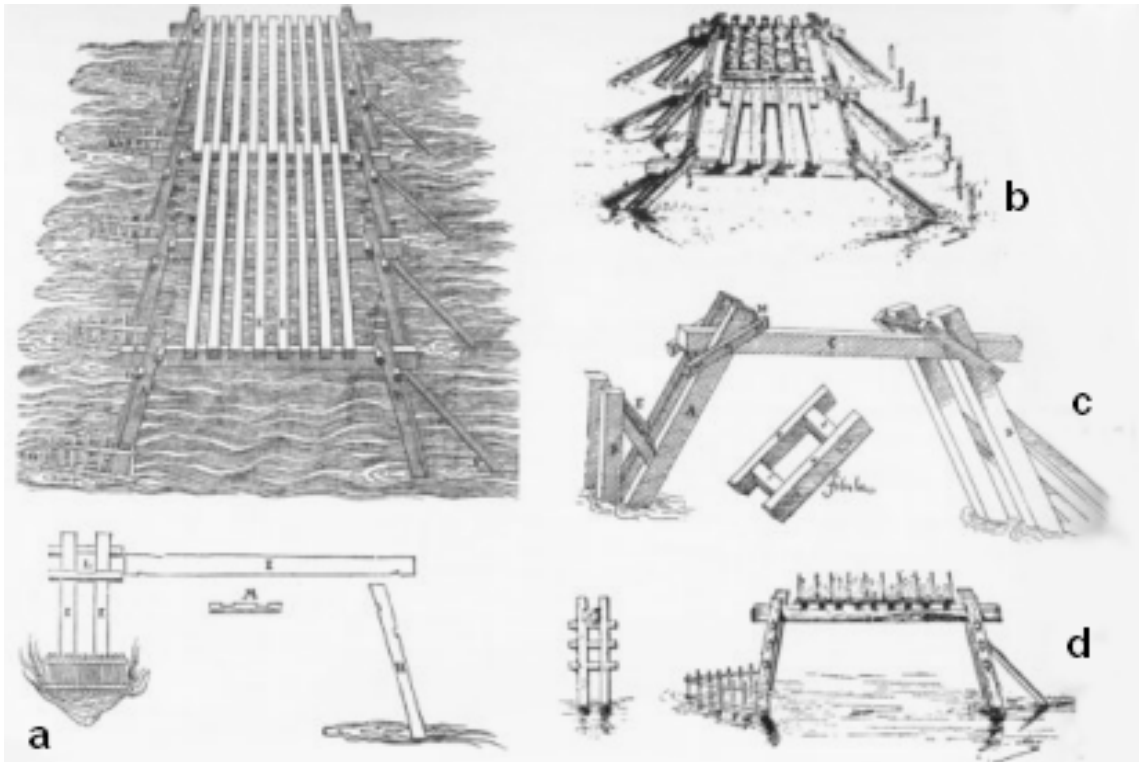


Ilustración I-8. Puente sobre el Rhin. Constructor: Julio Cesar. Representación interpretada por: a.- A. Palladio. 1570; b.- J. Lipsio. 1596; c.- "Los veintidós libros de los Ingenios"; d.- P. D'Ablancourt.

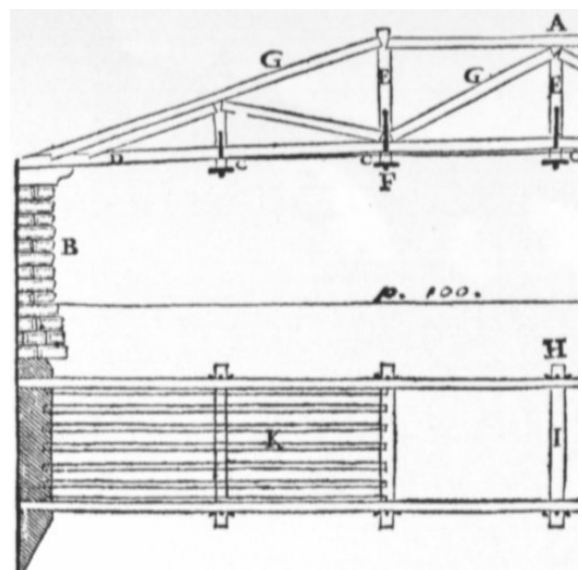
Otro puente del que conservamos su documentación gráfica, al estar presente en la columna Trajana que hizo Apollodoro de Damasco, fue el Puente de Orsovo [I-9]. Tenía 21 vanos de luces comprendidas entre 35 y 38 metros y pilas de fábrica de unos 15 metros; la longitud total estimada del puente superaba por tanto el kilómetro.



Ilustración I-9. Puente de Orsovo, representado en la columna Trajana

La tipología de los puentes de madera evoluciona rápidamente en la Edad Media y fue A. Palladio en el siglo XVI el primero que realiza, tras un riguroso estudio de la realidad construida hasta la fecha, una serie de diseños de vigas y arcos triangulados, con una intuición clara de su comportamiento resistente.

El puente sobre el Rhin de Julio Cesar [I-8a] y, posteriormente, el puente sobre el río Cismone [I-10], donde proyecta una viga triangulada de madera con empalmes metálicos salvando un vano de 30m., son claros ejemplos al respecto.



*Ilustración I-10. A. Palladio
Puente sobre el río Cismone*

A. Palladio presenta tres propuestas: “según los cuales se puede hacer un puente de madera sin ninguna pila en el río”. [I-11]

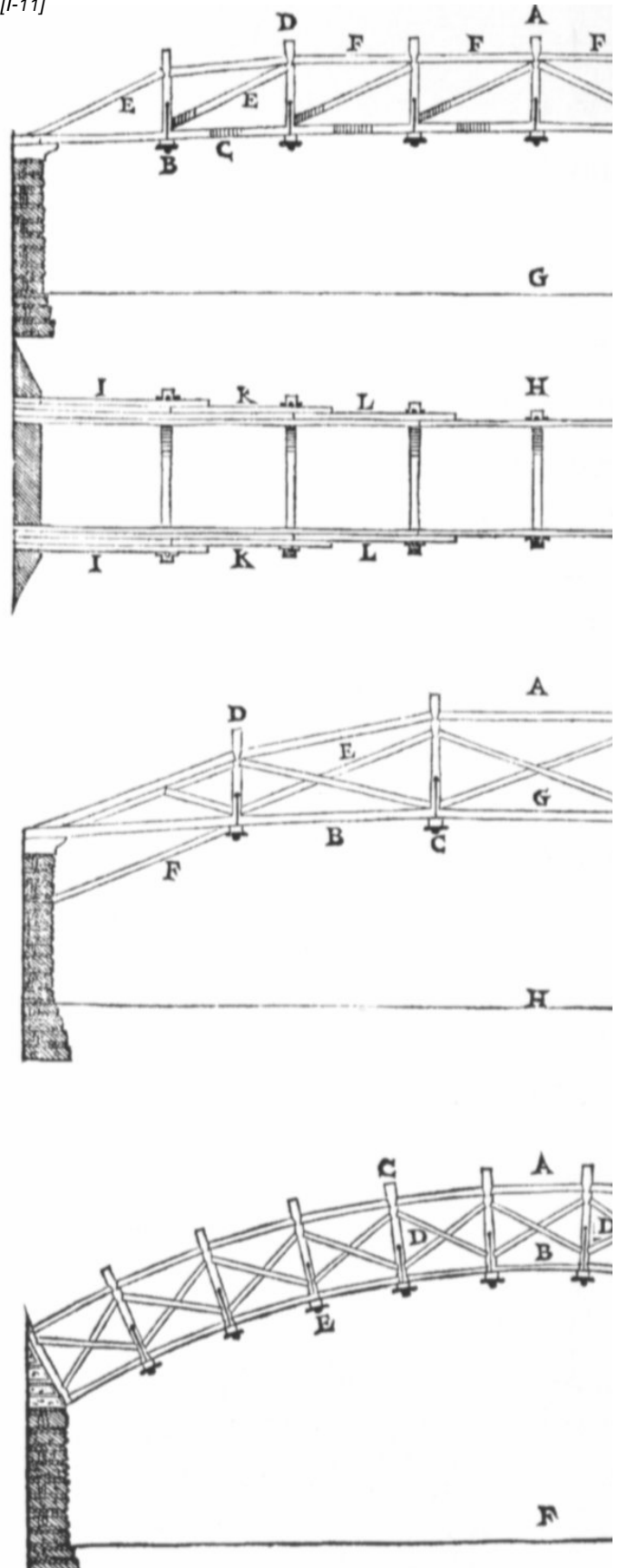


Ilustración I-11. A. Palladio
Tres propuestas para puentes

En 1570, A. Palladio construye el puente de Bassano sobre el río Brenta [I-12], se trata de una construcción con cinco vanos de once metros de luz cada uno, donde emplea una estructura clásica de jabalones apoyados en pilotes de madera hincados en el fondo del

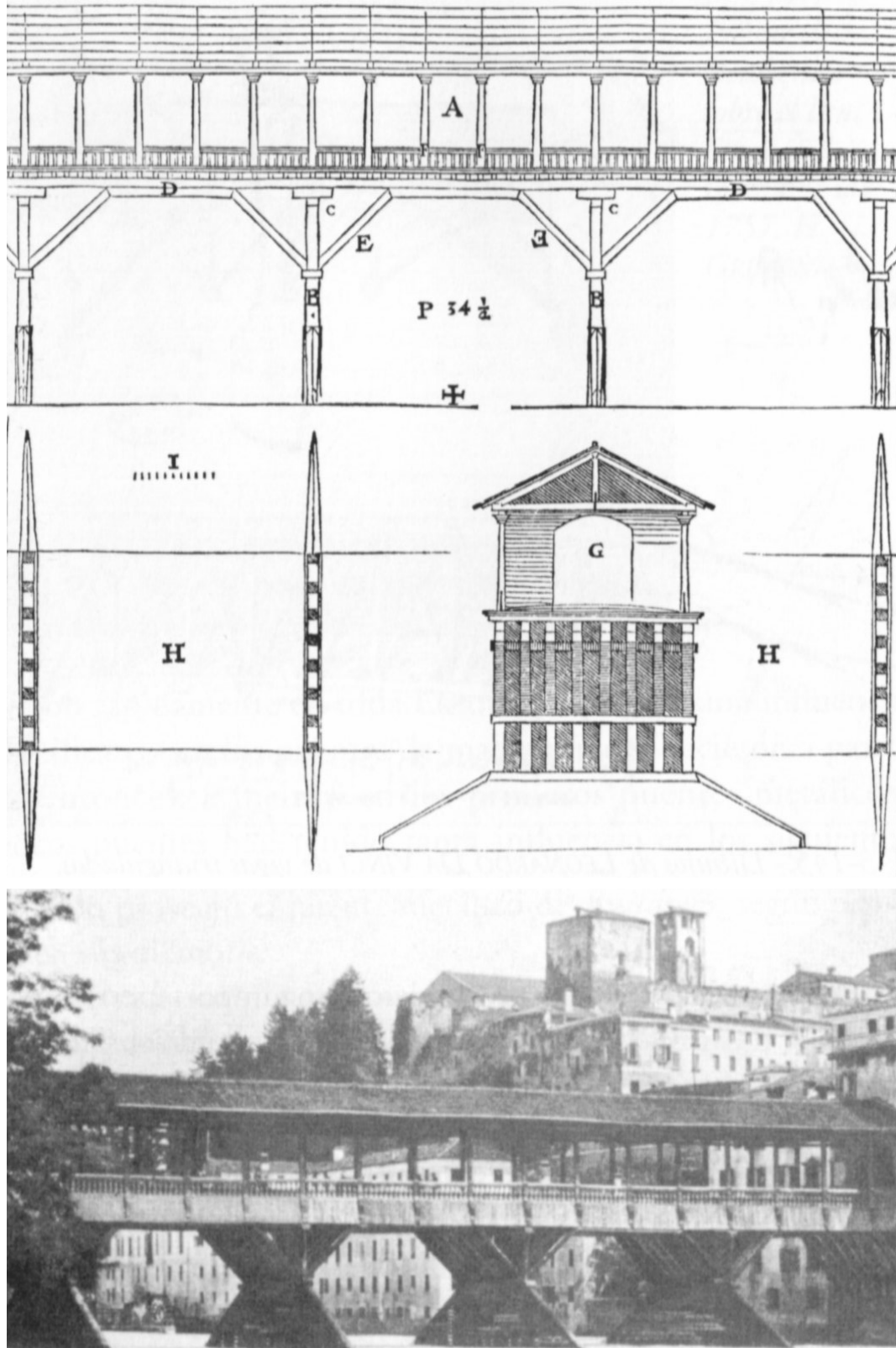


Ilustración I-12. Puente de Bassano sobre el río Brenta. Italia.
río.

Leonardo Da Vinci, omnipresente en todos los campos de conocimiento humano, realizó también diversas propuestas de estructuras trianguladas.

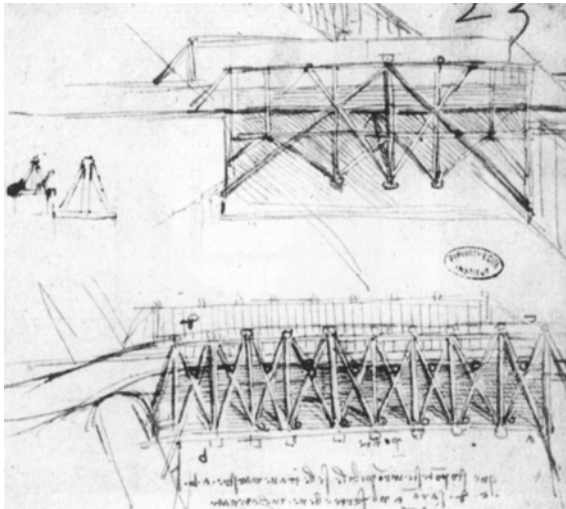


Ilustración I-13. Leonardo Da Vinci
Códice B. (2173)

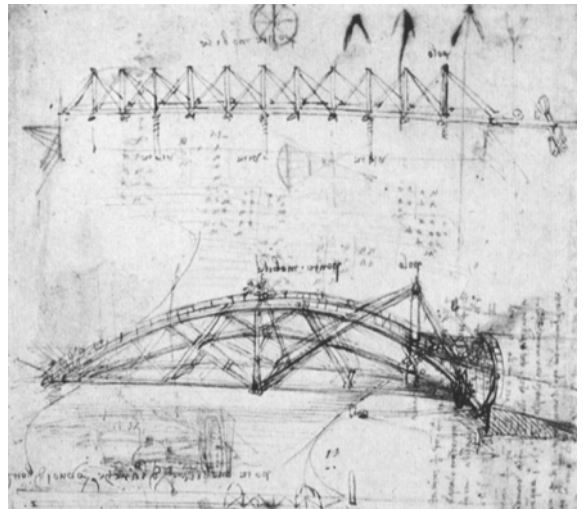


Ilustración I-14. Leonardo Da Vinci. Ponte Mobile
Códice Atlántico, c. 855r.

Los puentes de madera construidos hasta este período son contenidos en sus propuestas espaciales pero, sin duda, son el soporte de los conocimientos que, en la Edad Moderna y Contemporánea, permitirán al hombre un dominio tridimensional del espacio estructural.

Se muestran a continuación una serie de ejemplos que intentan mostrar el desarrollo constructivo y estructural alcanzado en los puentes de madera de este periodo:

Con la utilización de los denominados pórticos de jabalcones [I-15, I-16, I-17] se reduce la luz del vano segmentándolo en tres tramos. I. K. Brunel, uno de los más importantes constructores de puentes ingleses, investigó acerca del comportamiento resistente de la madera y sobre su protección, logrando un claro avance en la tecnología de este material.

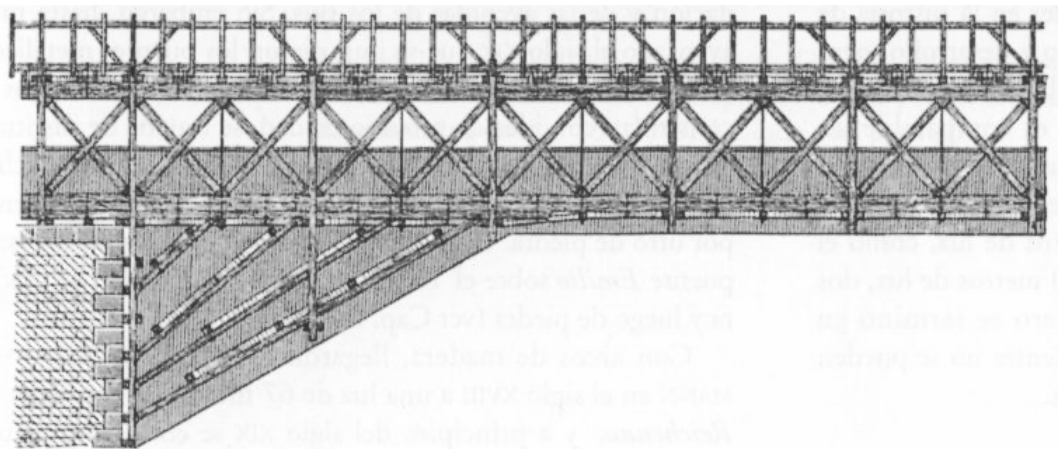


Ilustración I-15. Puente de Rusein-Tobel, cerca de Disentis, Suiza. 56m. de Luz. 1857.

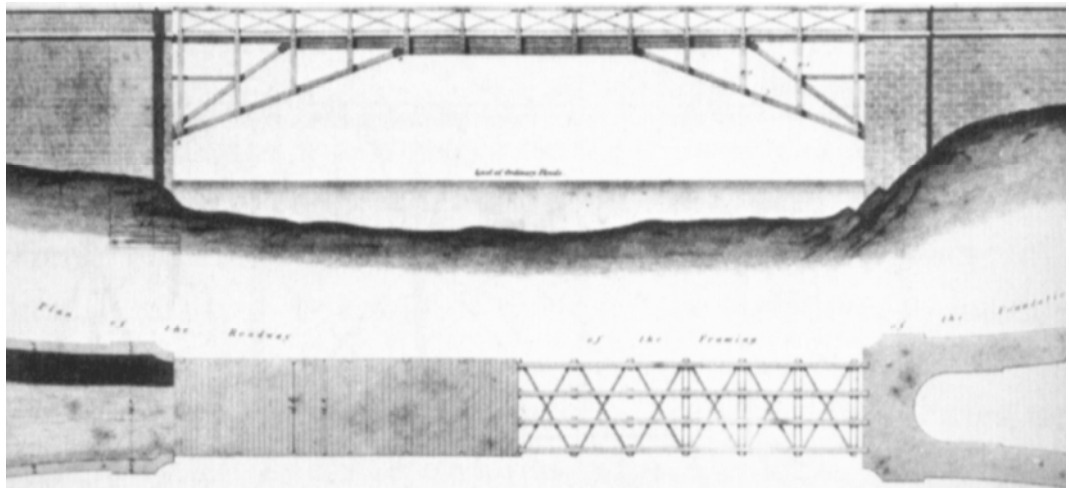


Ilustración I-16. Puente de Laggan. T. Telford.



Ilustración I-17. Viaducto de Gover. I. Brunel.

Las más clásicas vigas de celosía son sin duda las denominadas cruces de San Andrés; una variante a estas se emplea en el puente de Orford sobre el río Conneticut, [I-18] con una disposición muy cerrada, la denominada viga Town, patente del arquitecto americano Ithiel Town.



Ilustración I-18. Puente de Orford sobre el río Conneticut. E.E.U.U. Destruído por una avenida en 1936

Un salto importante desde el punto de vista conceptual lo constituye el desarrollo de los sistemas de conexión de tablas de madera. En este sentido hay que señalar al arquitecto francés Philibert de L'Orme como pionero en la utilización, en 1561, de elementos compuestos por tablas ensambladas por tijas de madera, con las que construyó arcos de hasta 15 metros de luz. La posterior utilización de bulones y clavos permitió la construcción de vigas curvas de madera constituidas por varias tablas delgadas enlazadas entre sí, claras precursoras de la futura madera laminada.

Los suizos Hans Ulrich y Johannes Grubenmann se encargaron de realizar las primeras propuestas utilizando dicha técnica; se trataba de arcos de media luna con un canto mínimo en los arranques y máximo en el centro. El puente de Schaffhausen, [1-19] con dos arcos de 52 y 59 metros de luz terminado en 1757 es una buena muestra de su trabajo.

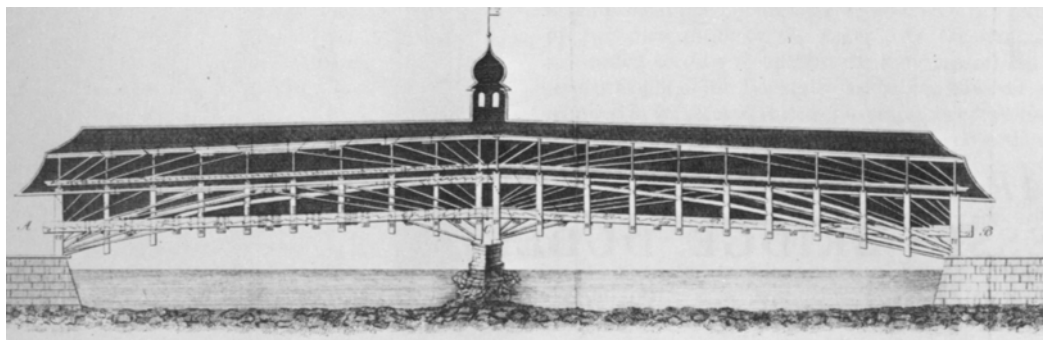


Ilustración I-19. Puente de Schaffhausen sobre el Rin. Suiza. 1757. H.U. Grubenmann.

Otro de sus grandes puentes, realizado junto con su hermano Johannes, fue el de Wettingen [1-20] sobre el río Limmat, terminado en 1778, con un vano de 61 metros de luz. Se construyó utilizando una viga de madera laminada, compuesta por siete capas, cada una de ellas constituida por piezas de alrededor de cuatro metros de longitud. La unión entre las laminas de la viga se realizó con una serie de abrazaderas de hierro dispuestas a lo largo del arco cada metro y medio aproximadamente.

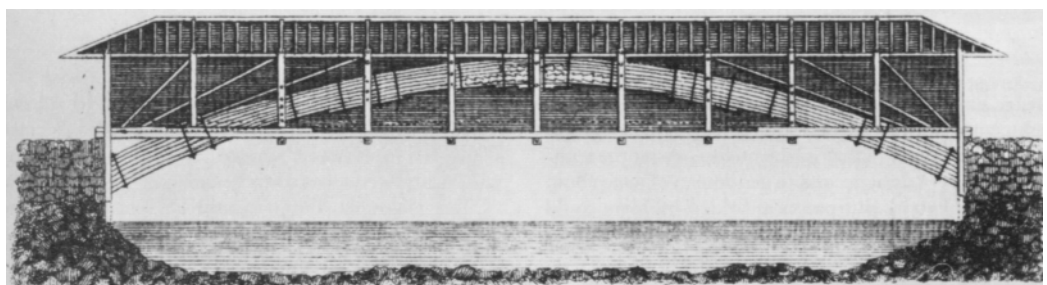


Ilustración I-20. Puente de Wettingen sobre el río Lammat. Suiza. 1778. H.U. y J. Grubenmann.

En Inglaterra, con ocasión del concurso para la construcción del puente de Westminster, se presentaron una serie de diseños de puentes extraordinariamente novedosos. El proyecto de James King [1-21] ganó el concurso con un proyecto que finalmente no se construyó; se trataba de un diseño espacial totalmente diferente a las primeras propuestas de A. Palladio.

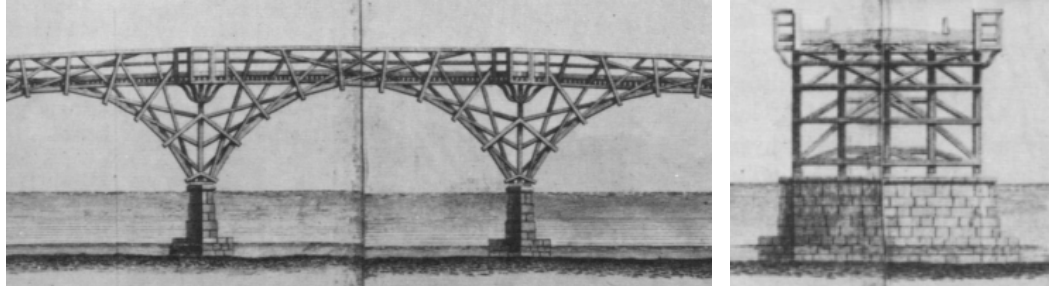


Ilustración I-21. Diseño para el Puente de Westminster. Inglaterra. 1737. James King.

Después de la muerte de J. King y utilizando su sistema, William Etheridge construyó en 1750 el puente de Walton, [1-22, 1-23] sobre el río Támesis. Para no obstruir el paso de las barcazas diseñó un puente con tres arcos de luces muy desiguales: un gran arco central que ocupaba casi toda la parte navegable del Támesis y que fue durante años el de mayor luz de Inglaterra y dos menores a ambos lados también de madera de 14 metros. Su apertura al público provocó numerosas protestas; se decía que ni una sola de las piezas del puente, excepto las que conformaban el suelo, podría retirarse sin afectar a las restantes.

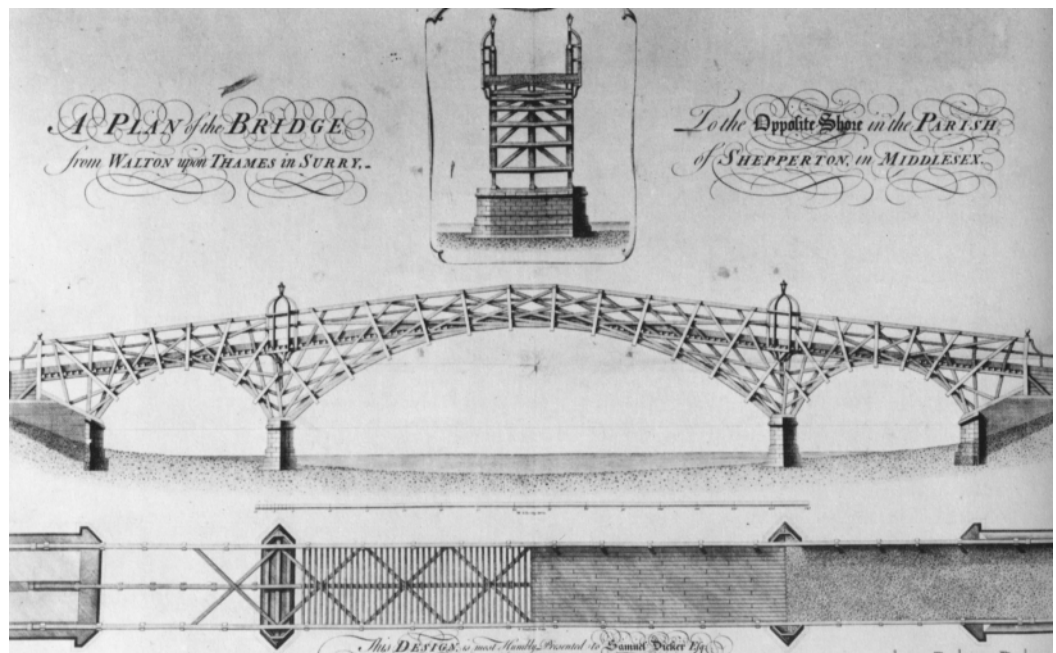


Ilustración I-22. Puente de Walton sobre el río Támesis en Surrey. Inglaterra. 1750. Willian Etheridge.



Ilustración I-23. Antonio Canal. Canaletto. 1754. Óleo sobre lienzo. 48,8x76,7 cm. Londres, Dulwich Gallery.

A principio del siglo XIX se construyeron una serie de puentes de madera con luces de gran envergadura, el puente de Galizia [1-24] con 102 metros de luz, construido por J. Jeckel con una estructura de jabalcones múltiples, constituye uno de los ejemplos más destacables.

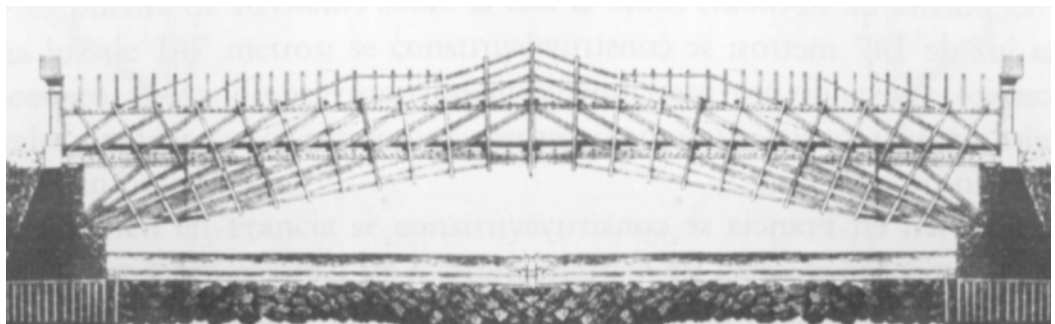


Ilustración I-24. Puente de Galizia. Polonia. 1809. J. Jeckel.

A partir de 1840 aparecen por primera vez las soluciones mixtas de hierro y madera, tales como la patente de Willian Howe con barras superior, inferior y cruces de San Andrés de madera y montantes verticales hechos con barras de hierro muy delgadas, que se pretensaban para que estuvieran siempre en tracción.

Una vez incorporando el hierro a la construcción de puentes, su producción en grandes cantidades y la consiguiente reducción de su coste además de sus buenas características mecánicas, desplazó rápidamente a la madera como principal material estructural en la construcción de puentes.

La madera ha tenido además una especial importancia en la construcción de estructuras auxiliares como apeos y cimbras. Un ejemplo significativo de este campo se refleja en los diseños de andamios y medios de elevación para la construcción de la iglesia de San Isaac en San Petersburgo que realizó el gran ingeniero español Agustín de Betancourt y Molina. [I-25, I-26]

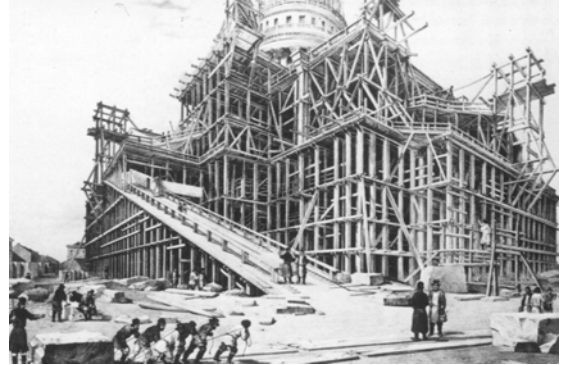
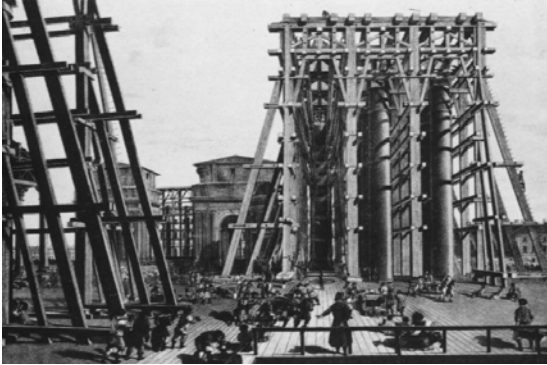


Ilustración I-25. Andamios para la construcción de la catedral de San Isaac. San Petersburgo A. de Betancourt. 1818.



Ilustración I-26. Elevación de la columna de Alejandro I. A. R. de Montferrand, discípulo de Betancourt. 1836.

En los tratados de arquitectura de la época se muestra el desarrollo tecnológico alcanzado en la construcción en madera, así como sus aplicaciones tanto en el campo de la arquitectura como en la ingeniería. En su tratado *“Elementos de Matemática”*, Bénito Bails, Director de matemáticas de la Real Academia de S. Fernando, describe con una gran calidad gráfica, una serie de ejemplos de diferentes armaduras y despieces de entramados de madera [I-27].

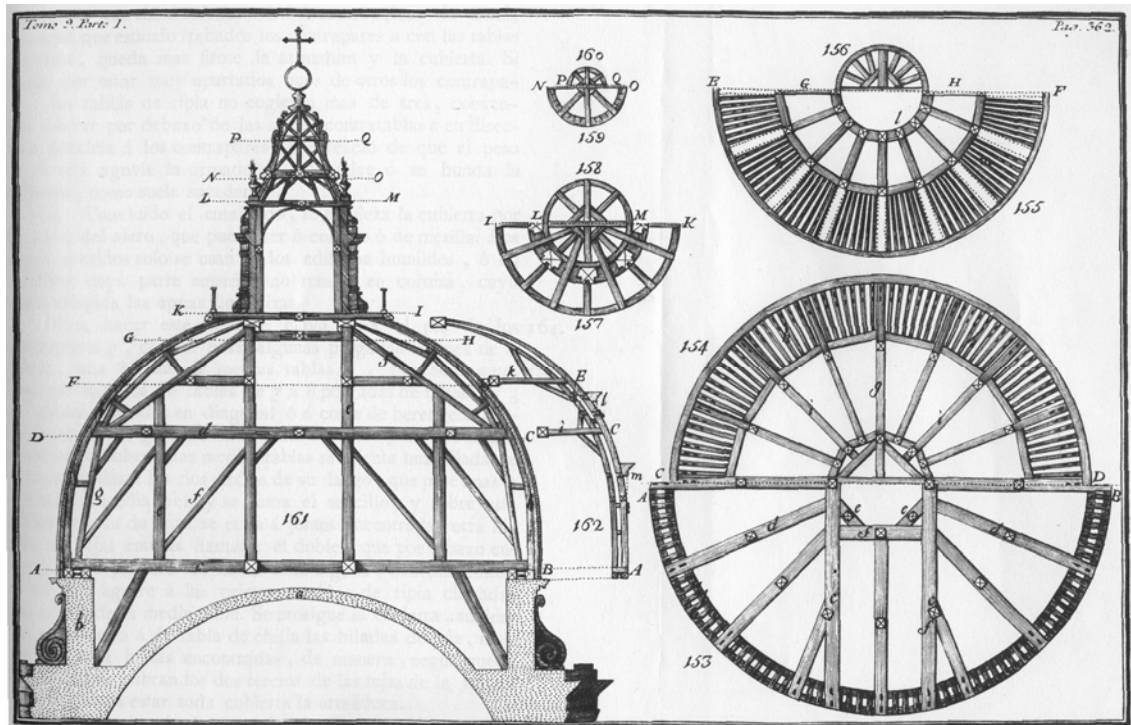


Ilustración I-27. Armadura de la cúpula de la Iglesia de Val de Grace. Paris.
Elementos de Matemática. D. Benito Bails. 1796.

En los dibujos de Philibert de L'Orme, [I-28 a I-36] auténtico precursor de las estructuras de madera laminada, se muestra un sistema para la construcción de formas arqueadas utilizando el único material disponible capaz de resistir esfuerzos de tracción: la madera. Se trata de unas piezas curvadas de pequeña dimensión que se ensamblan con unas tijas de madera.

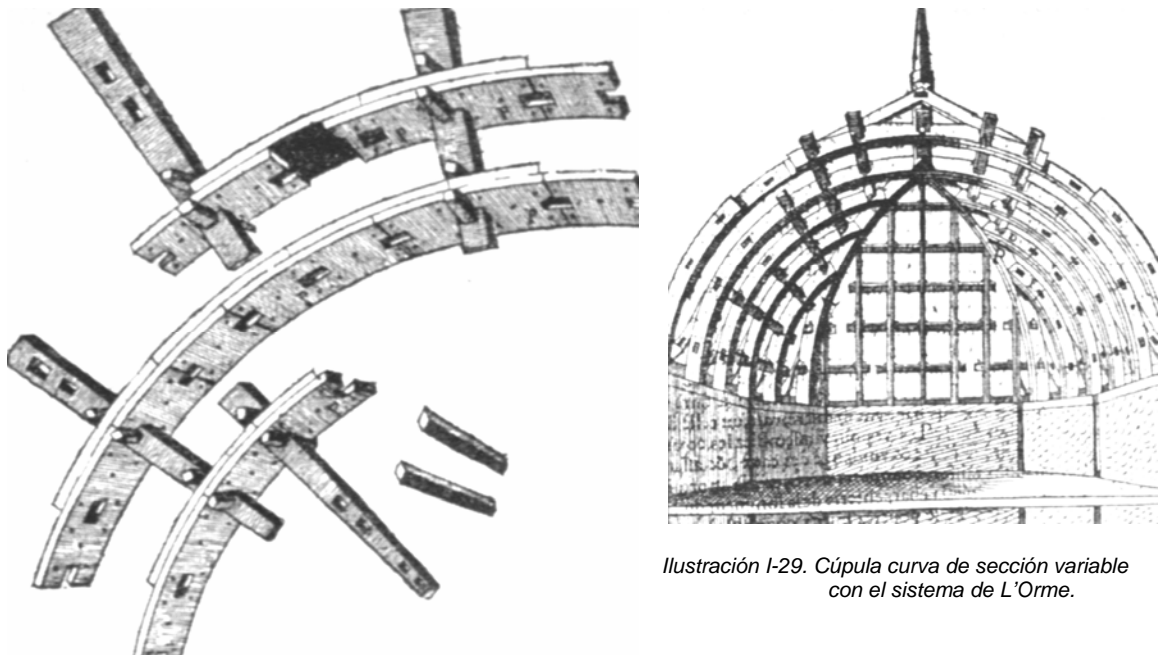


Ilustración I-28. Piezas de madera ensambladas con tijas.
Philibert de L'Orme.

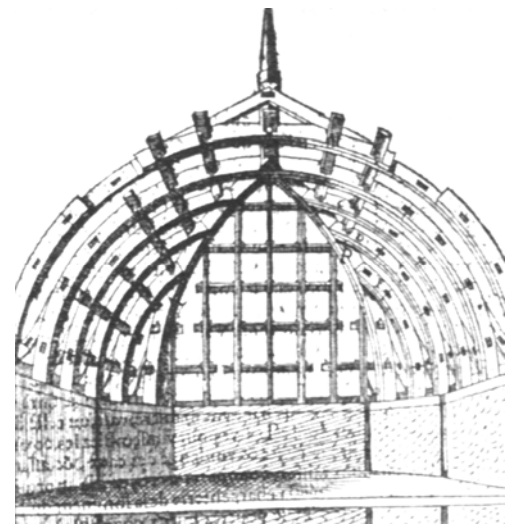


Ilustración I-29. Cúpula curva de sección variable
con el sistema de L'Orme.

Esta solución aporta una serie de ventajas: su poco peso, que las hace muy útiles para cubiertas sin excesivas sobrecargas; la posibilidad de mezclar maderas de distintas procedencias mientras tengan una resistencia similar, y finalmente el hecho de que sean piezas pequeñas independientes, aunque ensambladas, reduce las deformaciones que las variaciones de humedad provocan en la madera.

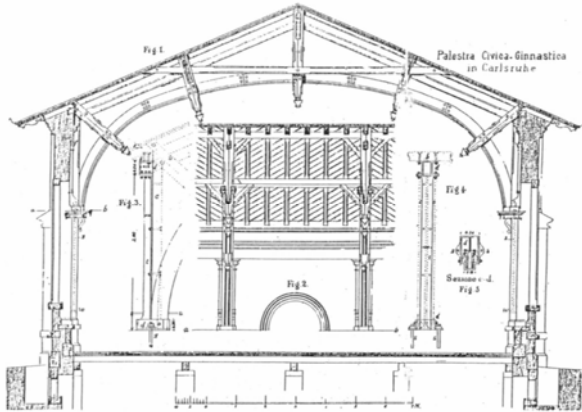


Ilustración I-30. Cubierta con el sistema De L'Orme.
Trattato generale di Costruzioni Civili
G.A. Brevman. 1884

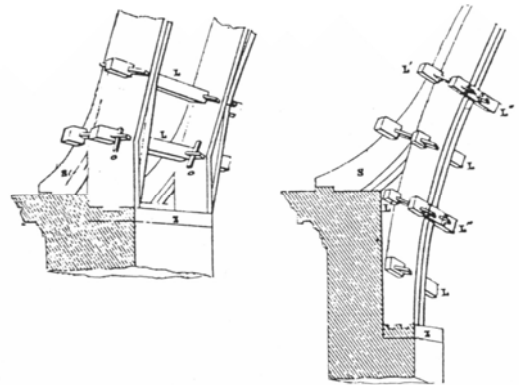


Ilustración I-31. Detalles de arcos.
Philibert De L'Orme. 1561

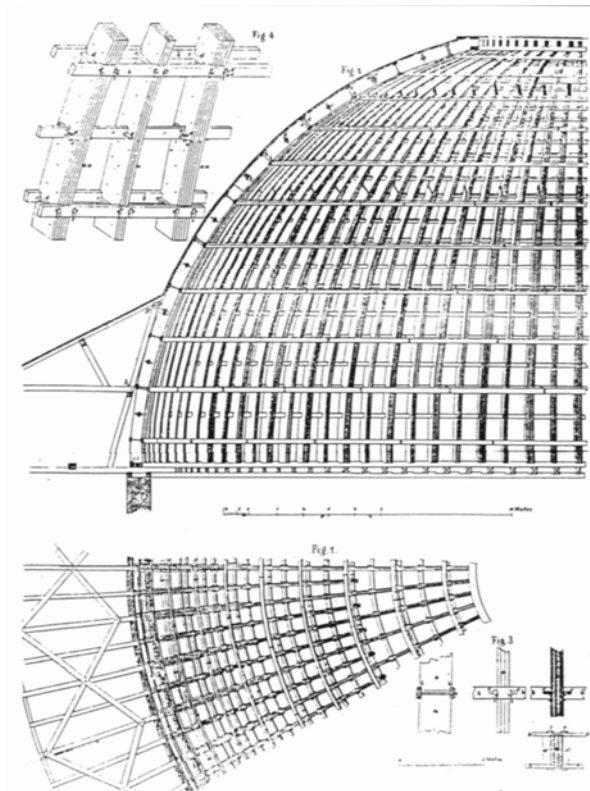


Ilustración I-32. Cúpula con el sistema De L'Orme.
Trattato generale di Costruzioni Civili
G.A. Breyman. 1884

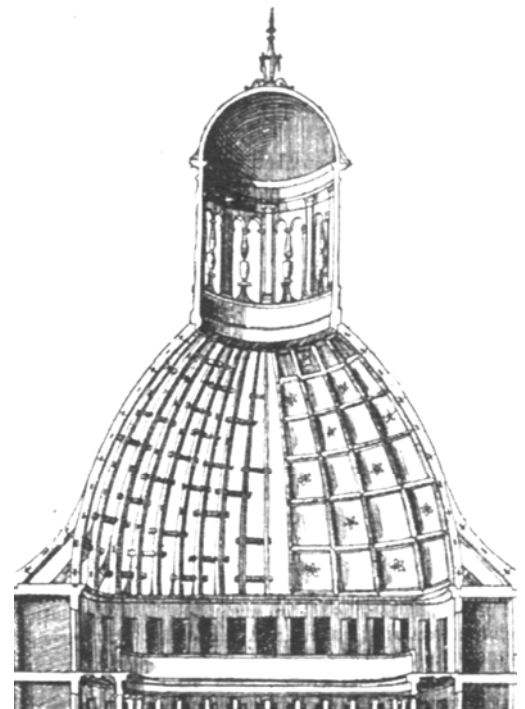
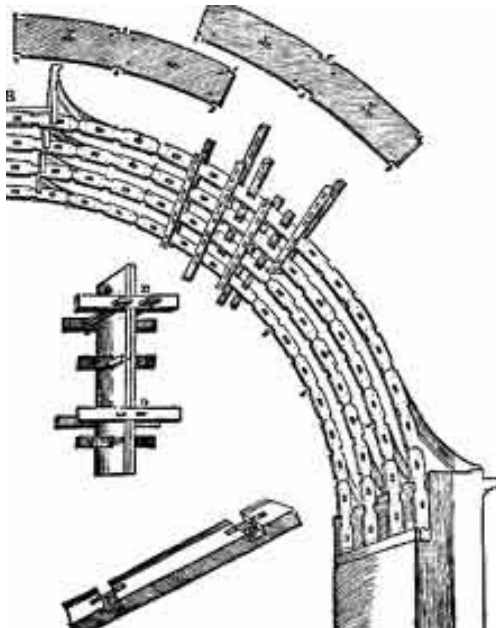


Ilustración I-33. Cubierta curva apuntada con
Linterna. Sistema de L'Orme



*Ilustración I-34. Caserne Rochambeau. Sistema L'Orme
Mont-Dauphin, Hautes Alpes. 1823*

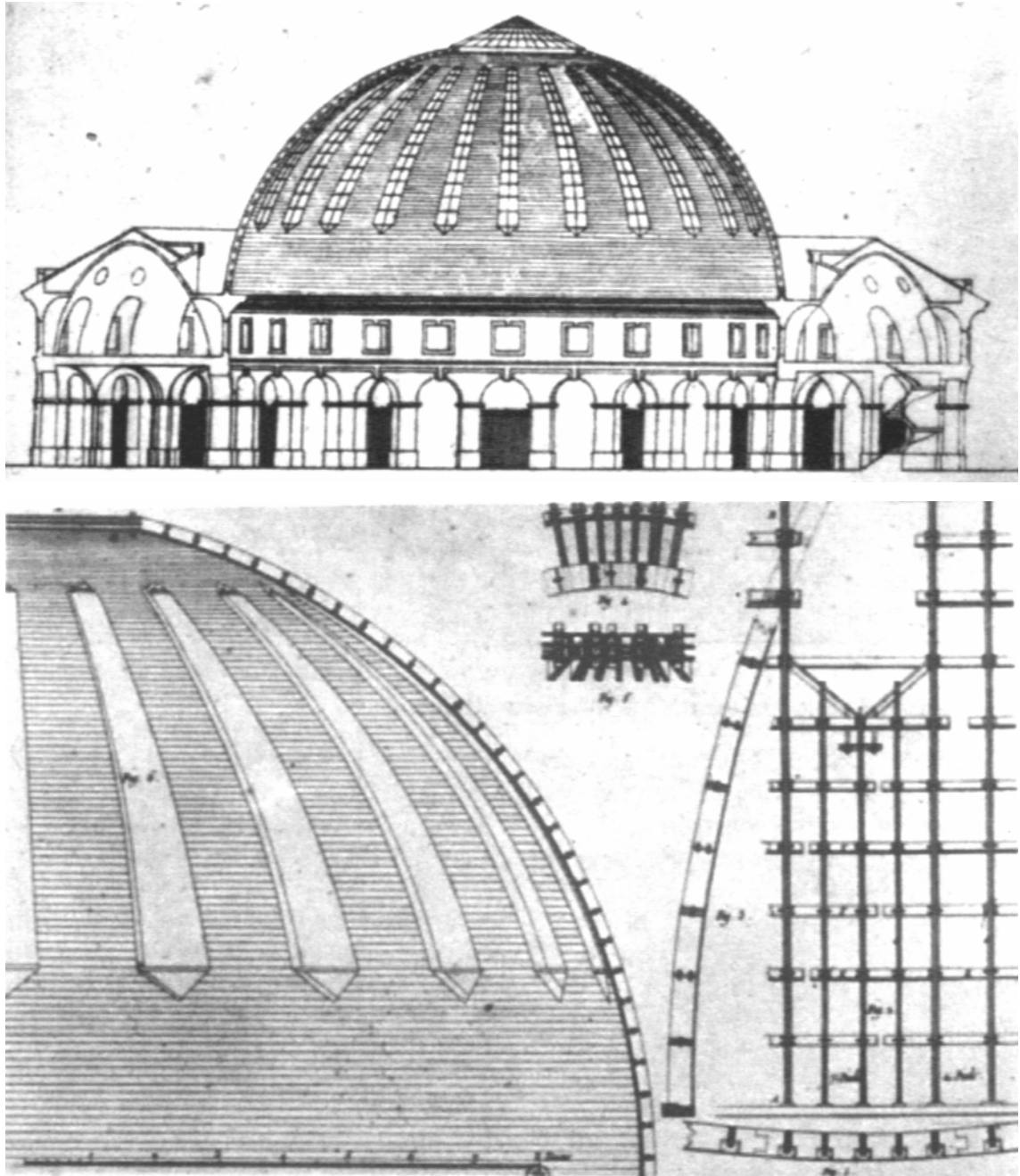


*Ilustración I-35. Esquema del entramado de la bóveda
Sistema Philibert L'Orme.*



*Ilustración I-36. Detalle del entramado de la bóveda
Caserne Rochambeau.*

Tomando como base de su propuesta los esquemas de L'Orme, Legrand y Molinos ganan el concurso convocado a principios del siglo XIX para la ampliación de “La Halle au Bleu” [1-37] en París. Proponen una fórmula absolutamente novedosa que consiste en un entramado de costillas de madera que soportan la cubierta y los lucernarios, apoyadas simplemente sobre el perímetro interior del anillo estructural. La solución construida apenas provoca empujes y los conectores laterales que ligan cada costilla con la contigua suponen un refuerzo adicional de la cubierta.



*Ilustración I-37. Cubierta de Legrand y Molinos para “La Halle”
Plans, coupes et élévations de diverses productions dñe l’art de la charpente. París. 1825*

La estructura de “La Halle” mostró su debilidad en 1802, como muchas otras estructuras de madera, a la acción del fuego, quedando totalmente destruida.

Con la publicación en 1828 de “*Description d’un nouveau sisystem d’arcs*”, el ingeniero francés Emy continua los trabajos de Philibert de L’Orme, al desarrollar el denominado “*sistema Emy*”, [I-38, I-39] y constituye conjuntamente con otros autores como los hermanos Grubenmann, el precursor de la futura madera laminada encolada.

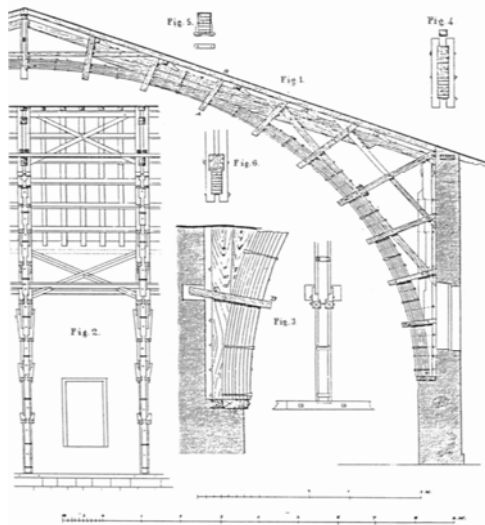


Ilustración I-38. Arco con sistema Emy

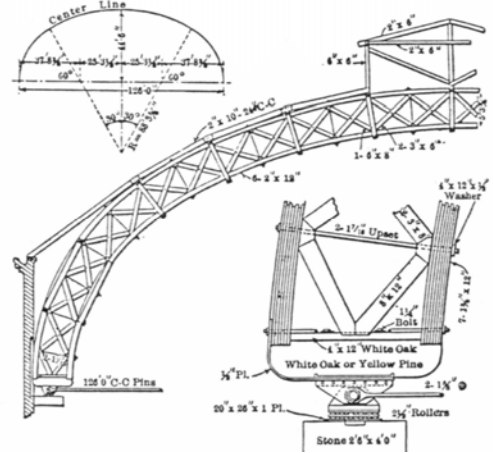


Ilustración I-39. Cubierta con arco de celosía con sistema Emy.

Otro tipo de estudios contemporáneos con los de Emy fueron los realizados por el ingeniero español A. de Betancourt. En el año 1817 el zar Alejandro I encarga al ingeniero el proyecto de una sala de ejercicios ecuestres en Moscú. Este diseña un edificio sencillo de planta rectangular cubierto con una gran cercha de madera [I-42 ,I-43] que salvaba sin apoyo intermedio alguno una luz de 32 metros . La propuesta está constituida por una cercha de poca pendiente, según sus palabras “*para que resultara más elegante*”, a pesar de que dicha solución requiere que algunas barras estén sometidas a mayores esfuerzos de tracción. Para mejorar el comportamiento de los enlaces, las uniones a compresión de la madera están realizadas mediante unas piezas especiales de fundición de hierro, evitando que dos piezas de madera entren en contacto directo.

Betancourt había ya resuelto con éxito el puente de Kamennostrovskii [I-40, I-41], con siete grandes arcos de madera, de los cuales el central era el mayor con unos 25 metros de luz. El ingeniero entiende que uno de los mayores problemas se deriva de los grandes esfuerzos de compresión que soporta la madera y que pueden dar lugar a cambios de su directriz; para paliar este problema introduce en los apoyos piezas muy rígidas de fundición.

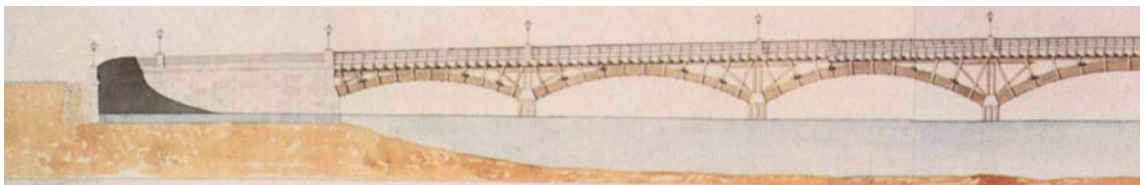
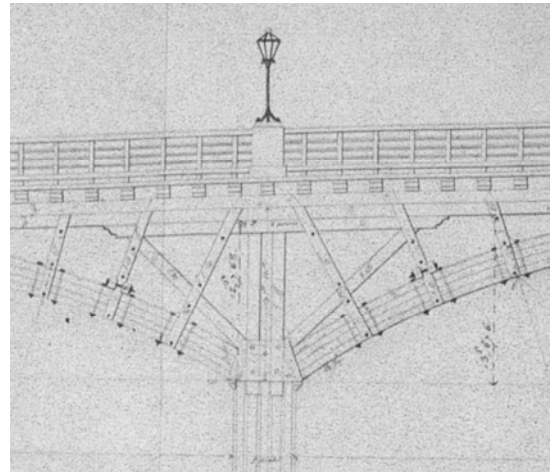


Ilustración I-40. Puente de Kamennostrovskii, sobre el pequeño Nevka. San Petersburgo. A. de Betancourt. 1811.



*Ilustración I-41. Puente de Kamennnoostrovskii
Detalle de nudo de enlace.*

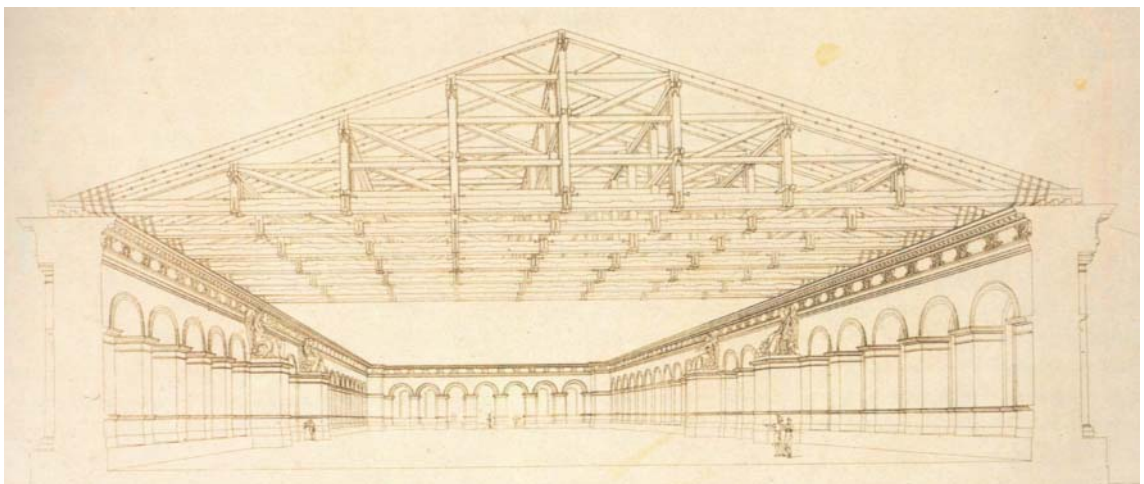


Ilustración I-42. Perspectiva de la cercha diseñada por Betancourt para la Sala de Ejercicios Ecuestres.

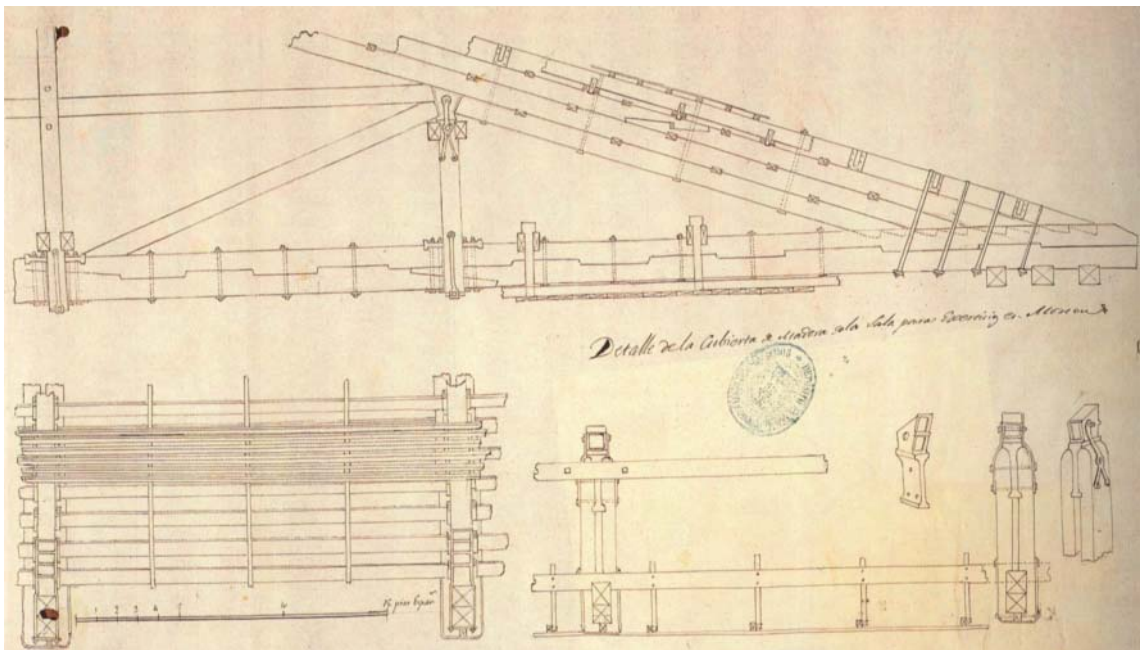


Ilustración I-43. Detalle de enlaces de la cubierta de madera de la Sala de Ejercicios Ecuestres.

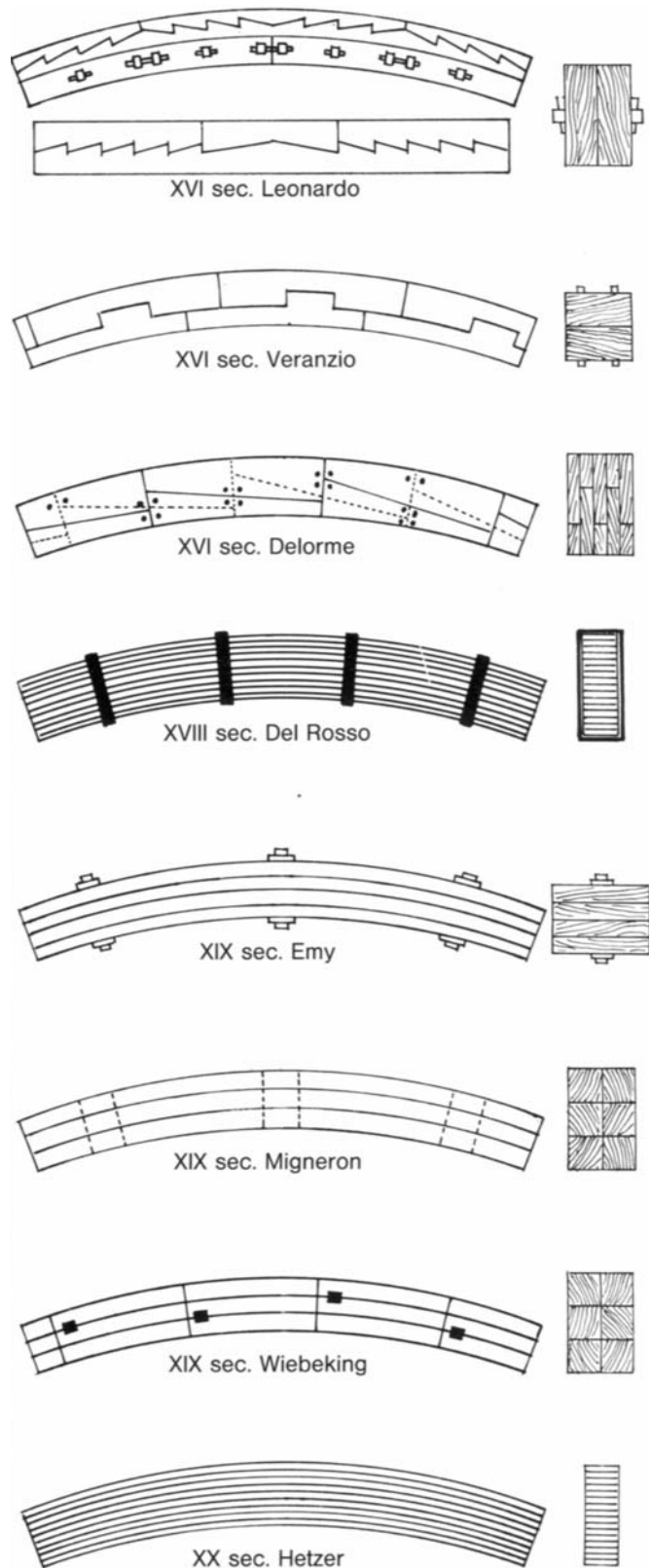
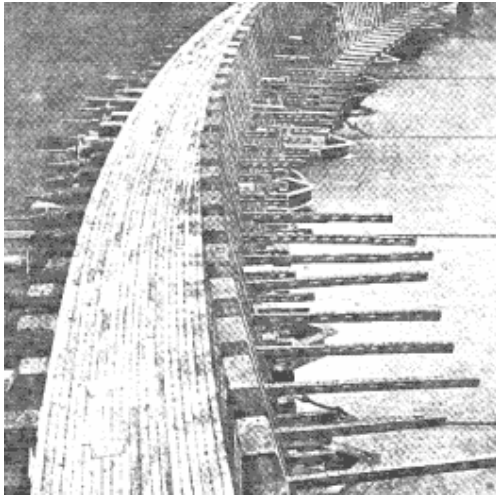


Ilustración I-44. Evolución de la viga de madera

El enorme desarrollo de la ingeniería del hierro y el descubrimiento en 1849 por Monier del hormigón armado, fueron entre otros factores los causantes de que la madera no recuperará su protagonismo como material estructural hasta la aparición de la madera laminada encolada. El coronel suizo Karl Friederich Otto Hetzer reemplazó los pernos por un adhesivo natural, la caseína en el año 1905 realizando las primeras construcciones de madera laminada encolada [I-45].



I-45. Prensado de una pieza de madera laminada encolada.

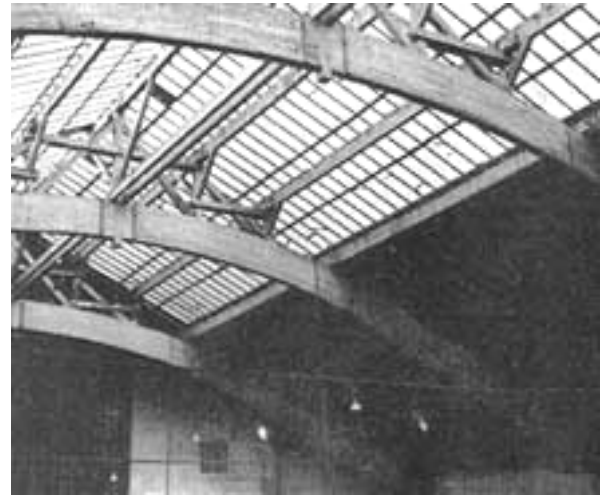


Ilustración I-46. Garaje construido con el sistema Sistema Hetzer. Paris. 1937

Posteriormente, durante la primera guerra mundial, se mejoró la tecnología de los adhesivos, incrementándose la fabricación de laminados de madera en la industria de la aviación y la madera estructural para la construcción [I-46]. El armazón de casi todos los aeroplanos se construyó con madera, generalmente de fresno y abeto, uniéndose las distintas piezas mediante clavijas, cola y grandes pernos.

Durante la segunda guerra mundial se desarrollaron adhesivos sintéticos, con los que se conseguía un buen comportamiento frente al fuego y una adecuada resistencia a los agentes atmosféricos. A partir de este momento se produce un importante avance en la construcción en madera laminada y su aplicación se extendió a la fabricación de puentes y construcciones marinas, en donde las condiciones de uso exigen alto grado de resistencia a condiciones ambientales muy agresivas. [I-47].



Ilustración I-47. Mosquito. Caza Bombardero de la 2ª Guerra mundial

La madera laminada ha permitido ampliar la gama de usos de la madera gracias a sus buenas cualidades estéticas, físico-mecánicas y de durabilidad. Por otra parte, el proceso productivo ha permitido la ejecución de elementos estructurales de forma, tamaño, funcionalidad y creatividad no logrados con otros materiales tradicionales.

Las ventajas de este nuevo material estructural son básicamente las siguientes:

- Un excelente comportamiento estructural, ante esfuerzos de tracción y compresión paralelos a las fibras y, en consecuencia, a flexión
- Favorable comportamiento ante la presencia de ácidos, óxidos y otros agentes corrosivos. Por tanto su utilización en ambientes agresivos es muy adecuada.
- Apreciable ligereza, con un peso específico del material que se mueve en una horquilla entre 350 kg/m^3 y 450 kg/m^3 .
- Alta durabilidad, siempre que los criterios de diseño y construcción hayan observado los principios básicos de protección contra la humedad, la pudrición y el ataque de insectos.
- Seguridad aceptable ante situaciones eventuales de incendios, por su sección transversal relativamente grande y su baja conductividad térmica, del orden de $0,13 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, la madera se quema muy lentamente y resiste la penetración del calor al formar una capa superficial carbonizada, con una conductividad térmica de $0,10 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, de tal manera que conserva una resistencia mecánica elevada.
- Posee una estabilidad dimensional elevada en el sentido de las fibras en comparación con otros materiales como el acero y el hormigón armado.
- Tiene excelentes cualidades de aislamiento térmico, acústico y eléctrico.
- Su construcción es un ejemplo de una eficiente utilización de recursos naturales obteniendo piezas de gran tamaño a partir de pequeña dimensión. Esto garantiza un abastecimiento permanente de materia prima, la cual por otra parte, proviene de un recurso natural renovable con un inmenso potencial industrial.
- Ahorro en el consumo de energía, ya que para convertir la madera desde su estado de materia prima a un producto listo para el consumo industrial requiere menos combustible que cualquier otro material comparable en la industria de la construcción. La producción de una tonelada de madera requiere una cantidad de energía del orden de seis veces menos que la utilizada en la fabricación de una tonelada de acero.

Es necesario asimismo, apuntar cuales son las características negativas de la madera laminada:

- Cambios dimensionales y alteración de las propiedades mecánicas como consecuencia de la variación en el grado de humedad y la duración de la carga entre otros.
- Alta vulnerabilidad ante los ataques realizados por agentes atmosféricos; tanto los rayos ultravioletas como la lluvia son elementos nocivos para su durabilidad.
- Baja resistencia a cortante lo que dificulta el diseño de los elementos de enlace para la transmisión de esfuerzos.
- Mal comportamiento resistente antes sollicitaciones perpendiculares a sus fibras.
- Deformaciones diferidas importantes.

Es por ello que en la segunda mitad del siglo XX se han construido innumerables estructuras, de gran complejidad y considerable tamaño. Las tipologías empleadas son muy diversas: sistemas triangulados, emparrillados de vigas, membranas y cascarones nervados y reticulados de simple y de doble curvatura, láminas plegadas, etc.. Se muestran a continuación una serie de ejemplos de proyectos ya construidos que ponen de manifiesto las grandes posibilidades estructurales y estéticas de este material.

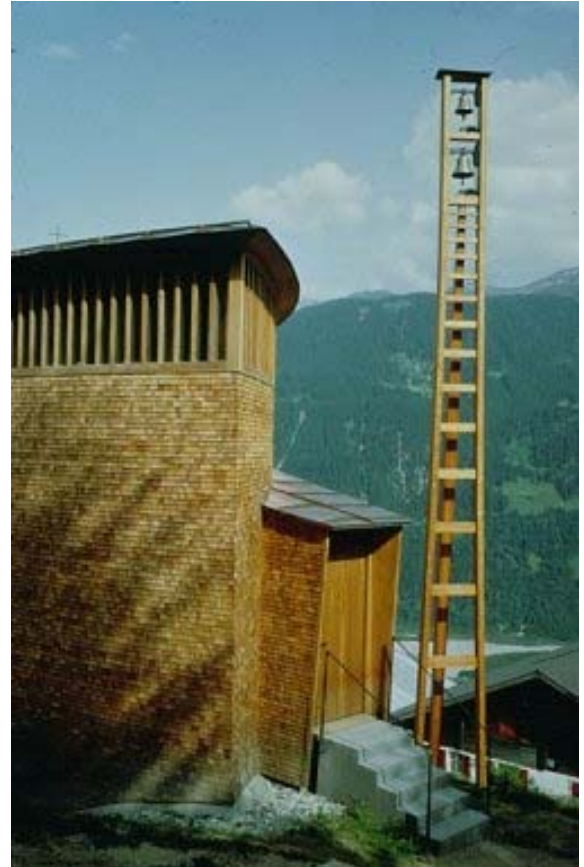
Como se refleja en estos antecedentes la madera laminada en el campo de las estructuras de cubiertas de grandes luces, es capaz de competir con otros materiales como el acero con la particularidad de ofrecer una estética perfectamente definida que permite la creación de espacios cubiertos de excelente calidad.



*Ilustración I-48. Escuela Superior de la Madera en Nantes. Francia. 1993.
Arquitecto. Jean Pierre Logerais.
Estructura: ICS Bois*



*Ilustración I-49. Expo Dach. Niedersachsen. Alemania. 2000.
Arquitecto. Herzog & Partner.
Estructura: IEZ Natterer GMBH.*



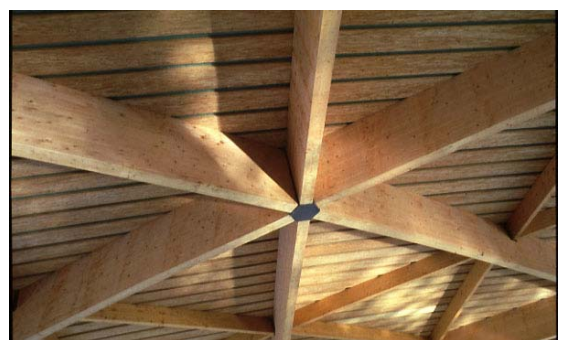
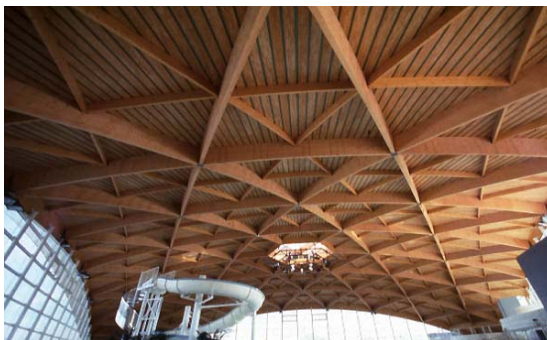
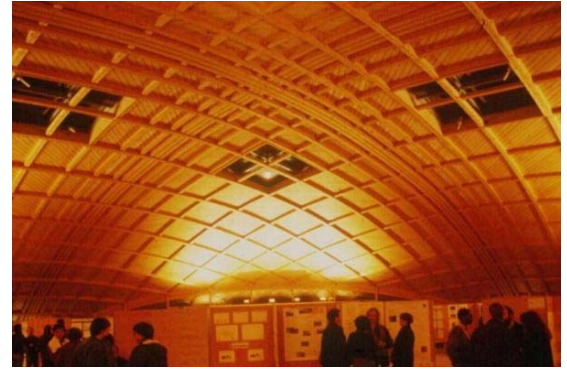
*Ilustración I-50. Capilla Sogn Benedetg
Arquitecto. P. Und A. Zumnthor*



*Ilustración I-51. Pabellón República Checa. Niedersachsen
D.U.M. Architekten
Estructura: Nemec&Polak*



*Ilustración I-52. Polidome. EPF Laussane. 1991
Arquitecto. Dan Badic
Estructura: Bois Consult Natterer, S.A.*



*Ilustración I-53. Piscina en Nogent. Val de Marne. 1995
Arquitecto. Roger Taillibert*



*Ilustración I-54. Museo NISA. Lelystad. Holanda. 1999.
Cees Christiaanse Architects.*



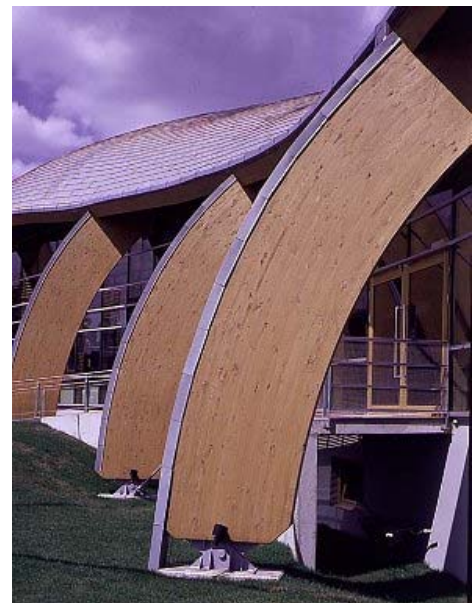
*Ilustración I-55. Museo NISA. Lelystad. Holanda. 1999.
Cees Christiaanse Architects.*



*Ilustración I-56. Formas Marinas. Multiusos. Lisboa. 1998.
Arquitecto. Regino Cruz, SOM
Estructura: Agibat MTI*



*Ilustración I-57. Pavillon der Hoffnung. Hannover. Alemania 2000.
Arquitecto. Buchalla & Partner.
Estructura: Eilers & Vogel.*



ANTECEDENTES DE LAS MALLAS ESPACIALES

La utilización de estructuras ligeras de grandes luces ha experimentado un incremento notable a lo largo del siglo XX; los progresos tecnológicos son sin duda, una de las razones de este avance, pero no podemos olvidarnos de la incidencia que ha tenido la creciente demanda de grandes espacios capaces de albergar manifestaciones sociales multitudinarias.

Graham Bell, a principios del siglo XX, en sus estudios sobre aparatos voladores, desarrolló una notable investigación acerca de la capacidad estructural de las mallas espaciales de tetraedros, poniendo de manifiesto su rigidez, ligereza y elevada capacidad portante. [I-58, I-59, I-60]

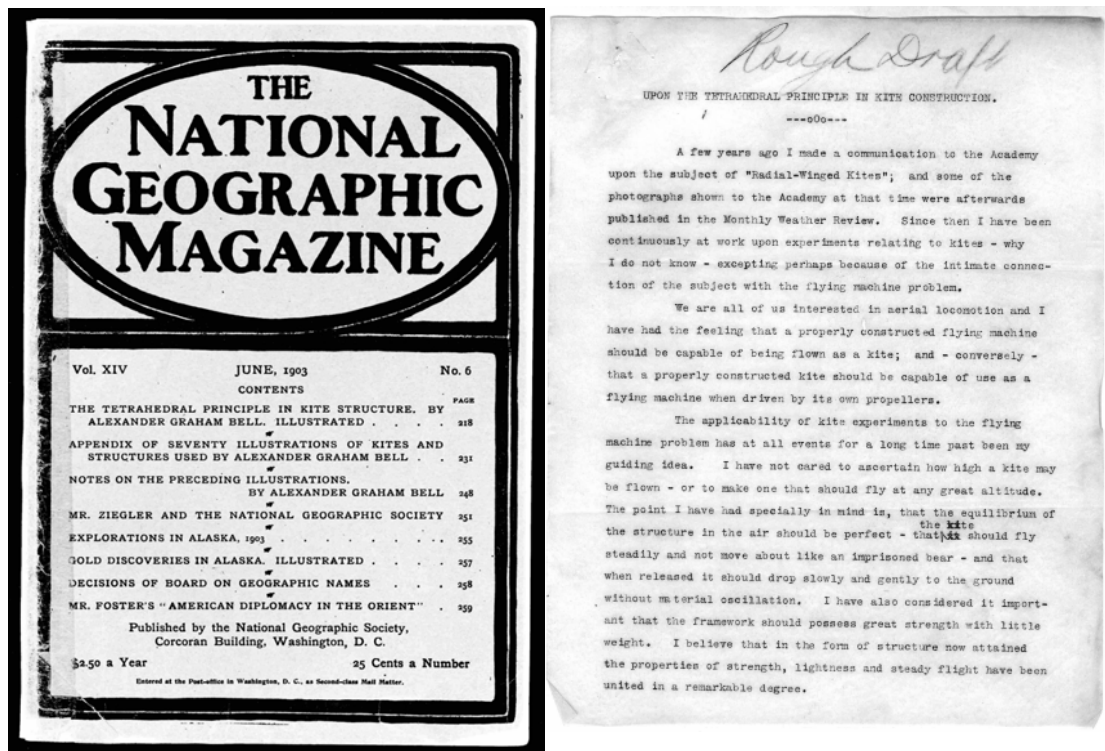


Ilustración I-58.- Graham Bell. The tetrahedral principle in kite structure. 1903

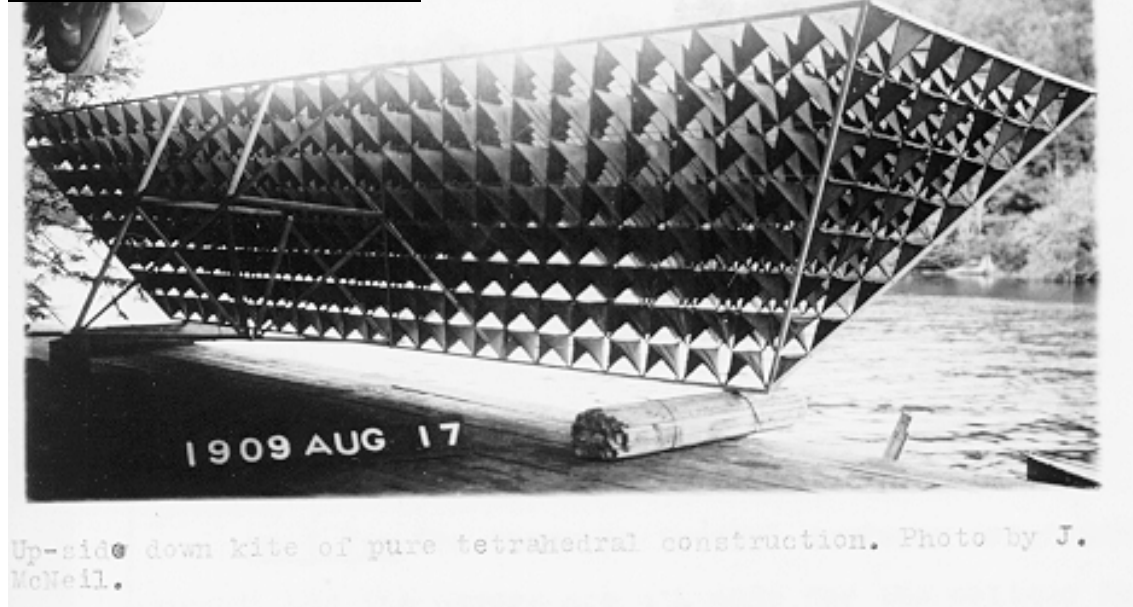
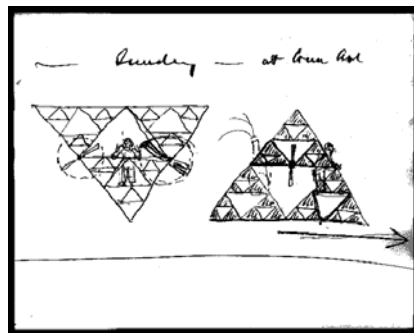


Ilustración I-59.- Graham Bell. Propuesta de un aparato volador constituido por una malla de tetraedros.

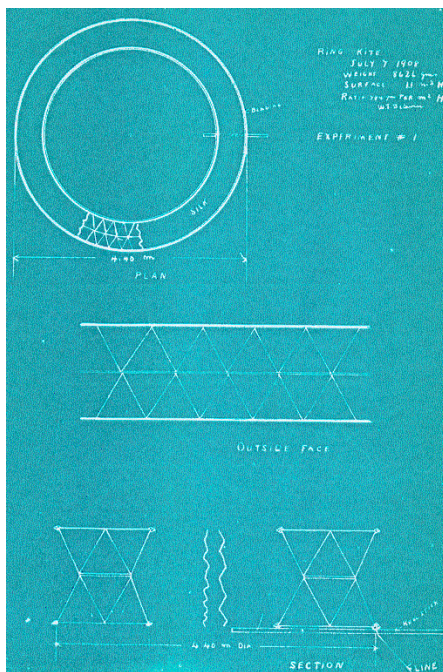


Ilustración I-60.- Graham Bell. Aparato volador de planta circular, constituido por una malla de tetraedros.

A pesar de que las propuestas de Bell se produjeron a principios de siglo, las mallas espaciales no se utilizaron en arquitectura hasta mediado el siglo XX. Durante los años 50 y 60 la utilización de las mallas espaciales proliferó en todo el mundo. Su desarrollo tecnológico se circunscribe básicamente a tres campos:

- Tipologías y geometría de la estructura
- Sistemas constructivos.
- Desarrollo de herramientas informáticas para su generación y posterior cálculo numérico.

Sin duda una de las figuras determinantes en el desarrollo de las tipologías de mallas espaciales fue el estadounidense Richard Buckminster Fuller (1895-1981). Son destacables especialmente sus trabajos sobre la generación de poliedros a partir del macizado del espacio con esferas y sobre la triangulación geodésica de la superficie esférica. Una de sus propuestas fue el edificio “Ford Rotunda”, [I-61, I-62] construido en el año 1953, donde aplicó el sistema “Octet Truss”.

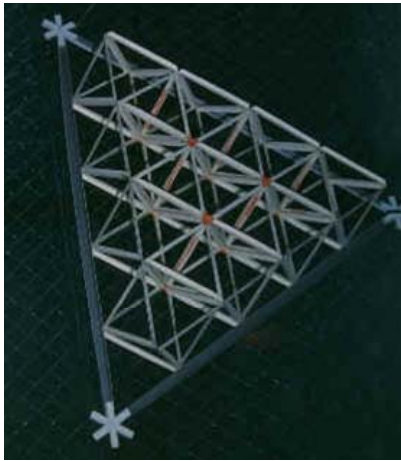


Ilustración I-61.- Octet Truss.
Ford Rotunda



Ilustración I-62.- Ford Rotunda. 1953. La utilización de piezas de unión superpuestas sobre las barras de aluminio, evitan la disposición de una pieza adicional de enlace.

En lo que respecta al desarrollo de los sistemas constructivos las investigaciones se han centrado en el diseño del elemento primordial en las mallas: el nudo de enlace. En el año 1940, Konrad Wachsmann [I-63] sistematiza las geometrías espaciales desarrollando un conector universal que permite a cada nudo recibir hasta 20 barras tubulares; Menherinhausen patenta en 1945 el sistema MERO [I-64] de mallas espaciales, probablemente el nudo más conocido y también el más copiado, lo que demuestra sin duda su acertado diseño.

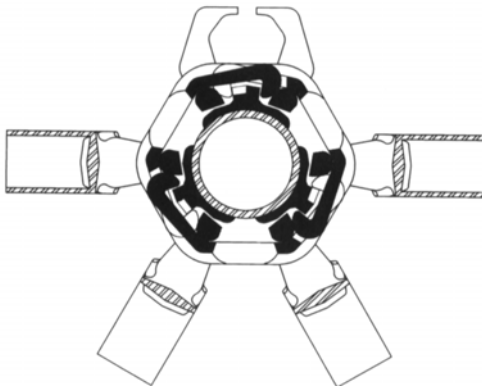


Ilustración I-63.- Sistema Wachsmann.



Ilustración I-64.- Nudo de enlace de barras.
Sistema Mero

En Francia, Stéphane du Chateaü, desarrollo en 1957, los sistemas de enlace conocidos como Tridirectionelle S.D.C. [I-65] para la conexión de barras tubulares y el sistema Piramitec, [I-66] en 1960 para su utilización en diferentes módulos piramidales.

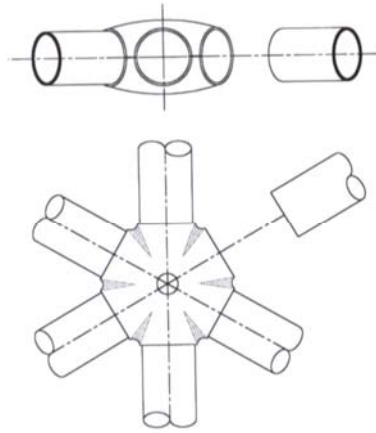


Ilustración I-65.- Sistema Tridirectionelle.

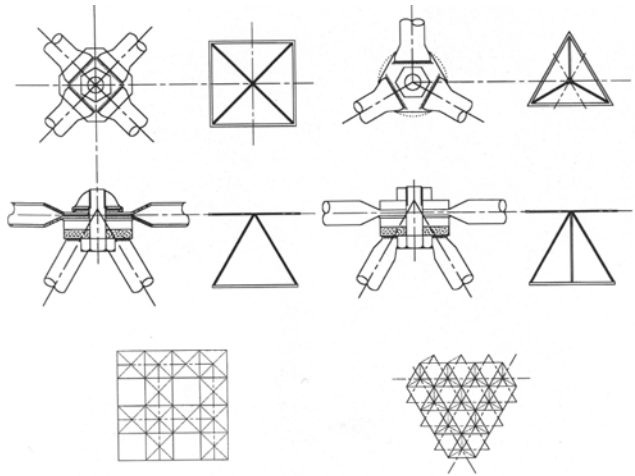


Ilustración I-66.- Sistema Piramitec.

En Canadá Fentiman Bross, usando el aluminio en nudos y barras, desarrolla en el año 1960 el sistema Triodetic, [I-67] se basa este sistema en el aplastado de los extremos de las barras para facilitar su enlace mediante una pieza cilíndrica de conexión.

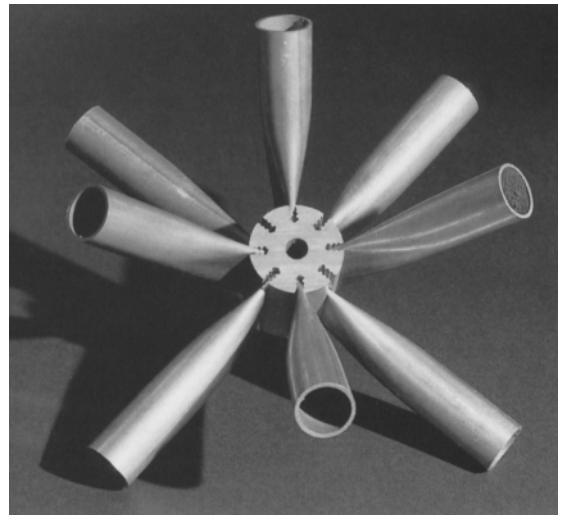


Ilustración I-67.- Sistema Triodetic

En Inglaterra Space Deck Ltd. of Chard comercializa en 1970 el sistema Nodus [I-68]. El nudo de enlace se diseña de forma que se produce un cierto empotramiento de las barras superiores, mientras que las diagonales que llegan al nudo se fijan mediante un pasador.

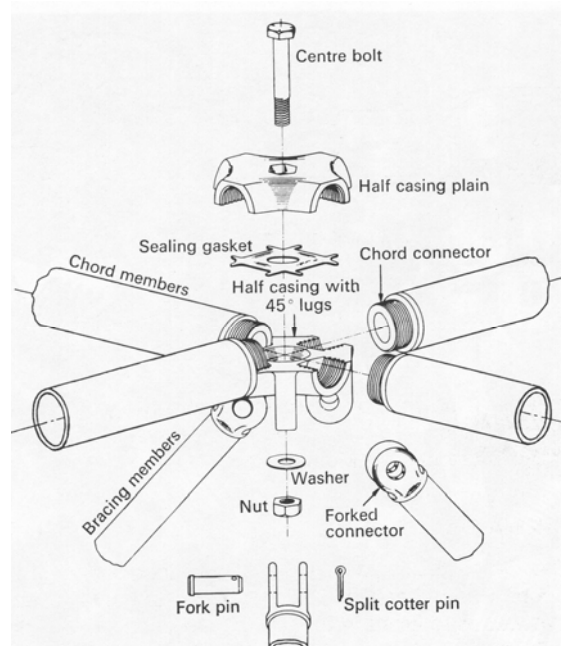


Ilustración I-68.- Sistema Nodus

Muchos otros diseños se han realizado buscando siempre nudos que permitan el enlace de las barras en cualquier posición de espacio, para generar así la mayor variedad posible de geometrías, alejándose de sistemas patentados que encarecerían la ejecución de la malla: TM truss, Orona SEO, Spheroabat, NS Truss, Orbik, Unistrut, Octoplate, Mai Sky, Catrus. Unibat, Cubic Space, Decks Space...

Se han desarrollado asimismo sistemas modulares para la construcción de mallas espaciales entre los que destaca el diseño de Denings of Chard, en 1950, denominado Space Deck, [1-69].

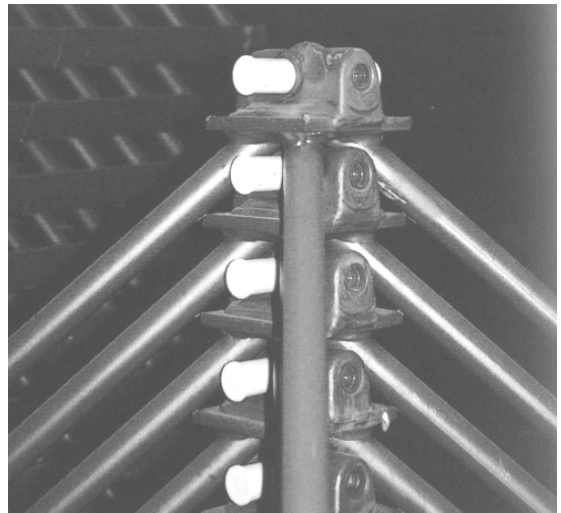
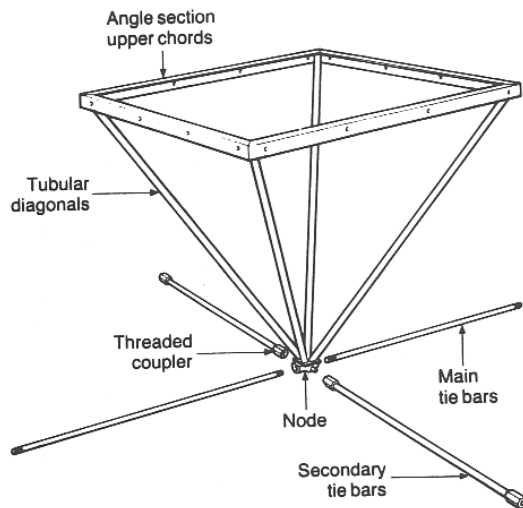


Ilustración I-69.- Space Deck.

En la búsqueda de una organización eficiente en el montaje y posterior izado de las mallas espaciales, el sistema Pantadome [1-70] del Ingeniero Mamoru Kawaguchi constituye un hito fundamental, si bien R. B. Fuller, en alguna de sus cúpulas geodésicas, ya planteó soluciones al problema de la erección del entramado, como en la de Honolulu en 1957, donde con un sistema de cuelgue desde una torre central sostiene la cúpula parcialmente construida. El sistema Pantadome, se basa en la no disposición temporal de una serie de barras del entramado haciéndolo inestable, permitiendo así su despliegue hasta la posición final, añadiendo entonces las barras deliberadamente omitidas.

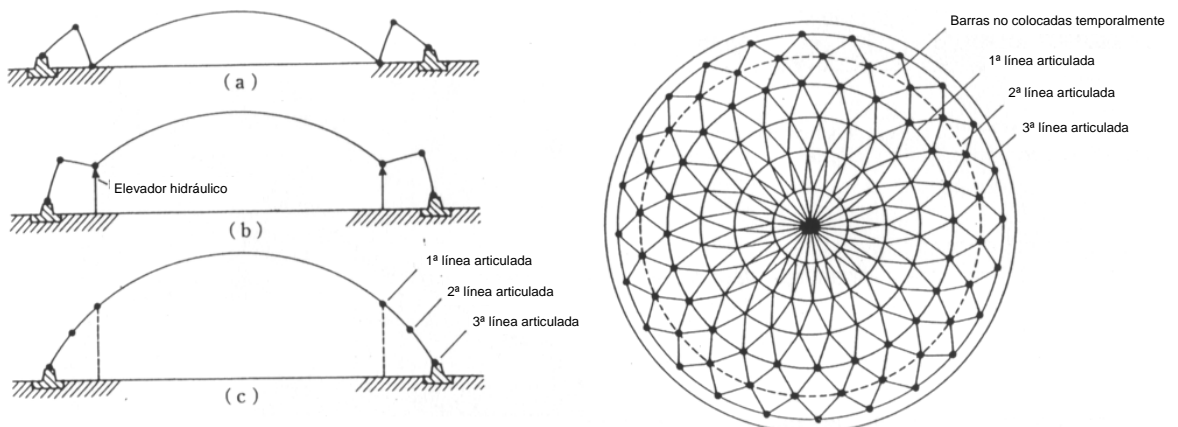


Ilustración I-70.- Sistema Pantadome. Tres líneas articuladas permiten la elevación de la cúpula.

El World Memorial Hall de Kobe terminado en el año 1984 para la Universiada'85 [I-71 a I-74] es la primera gran estructura en la que se aplicó el “sistema Pantadome”. Para su elevación se diseñaron tres líneas articuladas a cada lado, así como soportes temporales extensibles de 6,50 metros de alto elevando posteriormente la estructura hasta su posición definitiva situada a una cota 20 metros más alta.

Para el control de todo el proceso de izado de la estructura, fueron cuidadosamente monitorizados los siguientes parámetros en cada uno de los dieciocho soportes temporales extensibles:

Desplazamiento vertical y horizontal, carga y presión de las unidades hidráulicas, todo ello enlazado con la información recogida por 281 bandas extensométricas colocadas en la estructura de cubierta, lo que permitió un control automático del proceso de nivelación en 33 puntos.

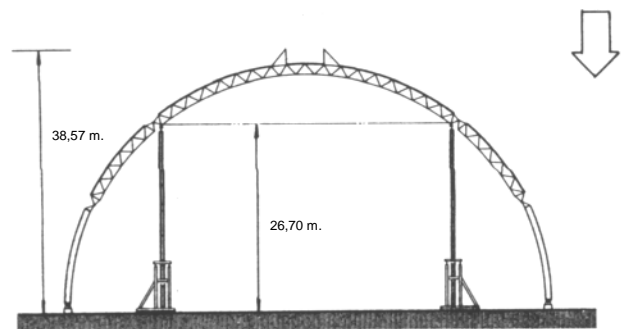
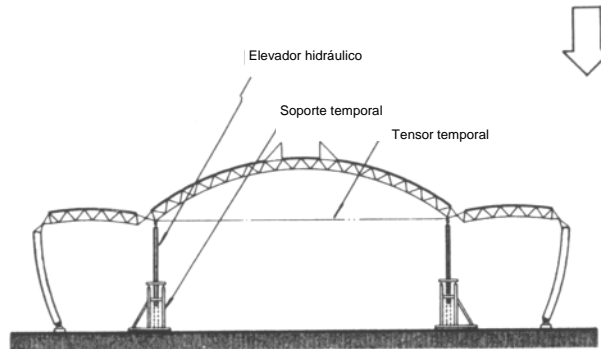
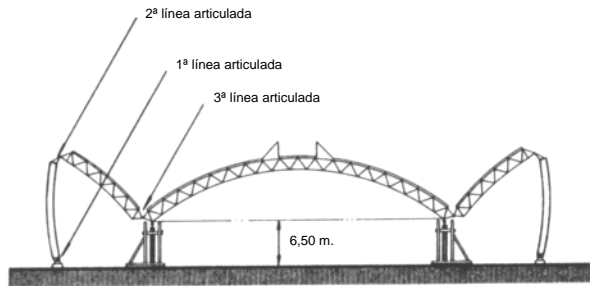
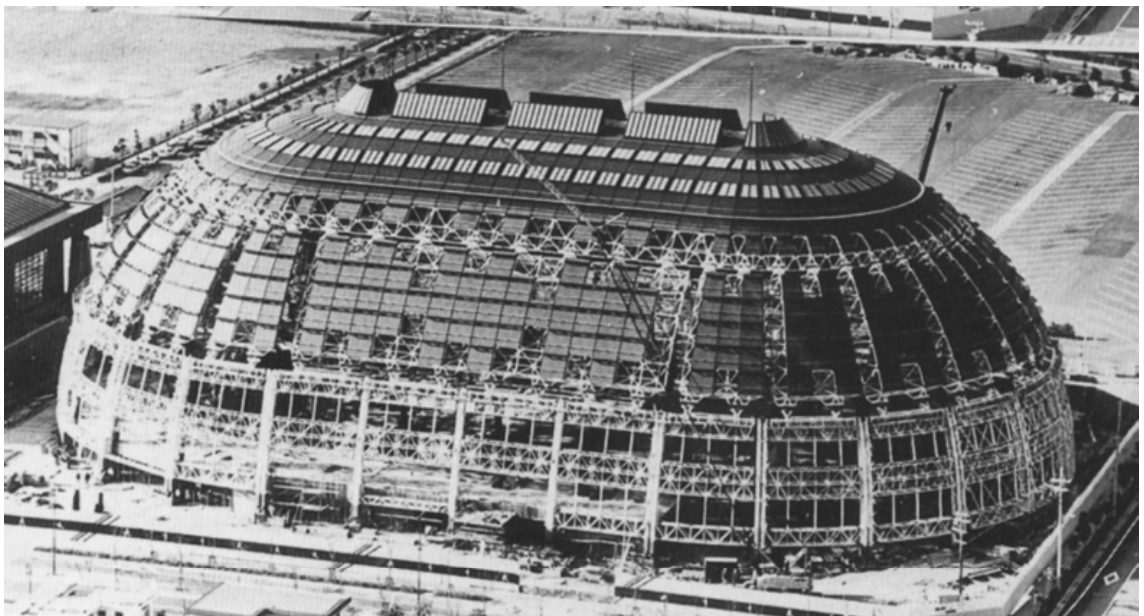
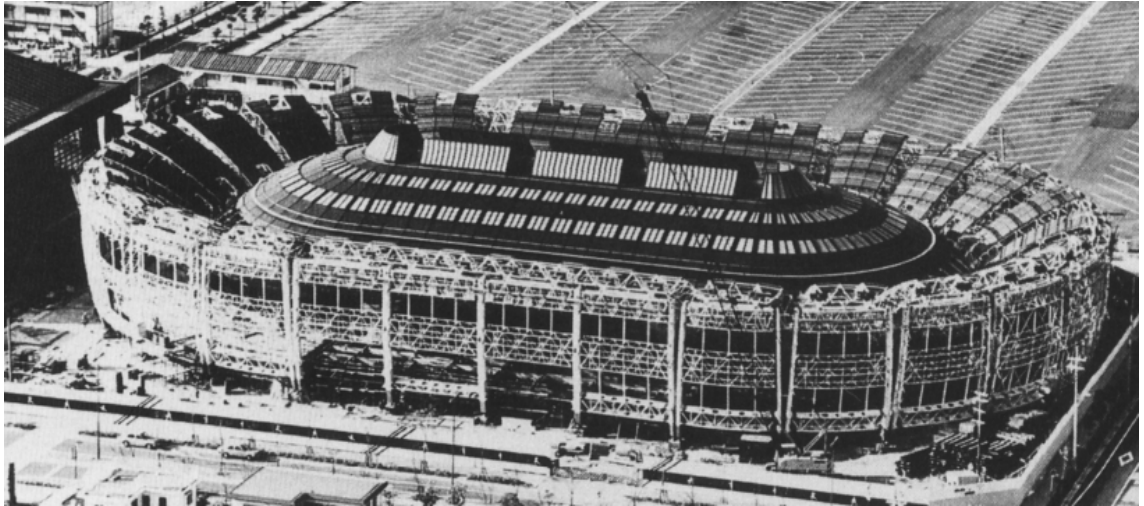


Ilustración I-71.- World Memorial Hall. Fases de izado.
Sistema Pantadome. M. Kawaguchi., 1984



Ilustración I-72.- World Memorial Hall.
Sistema Pantadome.
M. Kawaguchi., 1984



*Ilustración I-73.- World Memorial Hall. Arquitecto: S Mitsumune
Dos fases del izado de la estructura, sistema pantadome. M. Kawauchi., 1984.*



*Ilustración I-74.- World Memorial Hall. Vista Interior.
Arquitecto: S Mitsumune*

La incorporación integral de los procesos informáticos al diseño y fabricación de mallas espaciales rompe con los límites formales de las estructuras posibilitando la concepción y construcción de tipologías irrealizables tan sólo hace unos años.

El estadio de Split en Croacia, [I-75] constituye probablemente el primer ejemplo de importancia en la aplicación del CAD a esta tipología. El Palau San Jordi [I-76] del arquitecto Arata Isozaki muestra la máxima expresión del empleo del CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacture) y CNC (Computerized Numeric Control), en todo el proceso de definición geométrica, cálculo y construcción de una malla espacial. La estructura de cubierta esta compuesta por 9.190 barras, con un diámetro variable entre 76mm. y 267mm., excepto determinadas barras perimetrales cuyo diámetro varía de 406mm. a 508mm. Estas barras se conectan mediante 2.043 nudos esféricos de acero con diámetro variable de 100mm. a 250mm. La construcción de estos elementos fue realizada por la empresa Orona, que fabricó los diferentes tubos de acero y los nudos de enlace con sus correspondientes taladros roscados de acuerdo con las dimensiones y ángulos de acometida de las barras.

Tanto la mecanización de los nudos esféricos como el corte de tubo y la soldadura de barras se realizaron en máquinas de control numérico de gran precisión comandadas por el sistema informático global. Este tratamiento integrado de diseño y fabricación ha posibilitado la construcción de esta estructura de extraordinaria complejidad geométrica, favoreciendo el control y, en definitiva, propiciando la total fiabilidad del proceso productivo.



Ilustración I-75.- Estadio de Split. Croacia. B. Magas. 1979.

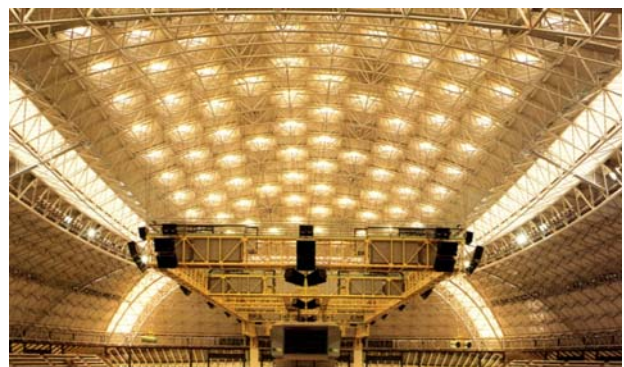


Ilustración I-76.- Palau San Jordi. Barcelona. Arata Isozaki, Mamoru Kawaguchi. 1992.

ANTECEDENTES DE LAS MALLAS DE MADERA

Dado el extraordinario desarrollo de las estructuras de madera a partir de las investigaciones de Otto Hetzer, y las grandes posibilidades que brinda la tipología de mallas espaciales para la cubrición de grandes espacios, resulta sorprendente que la utilización de la madera en mallas espaciales haya sido prácticamente simbólica.

En lo que respecta a las mallas espaciales de doble capa, los antecedentes son mas bien escasos; las Universidades de Delft y Eindhoven en Holanda, son los principales centros de investigación en los cuales se han desarrollado estudios sistemáticos acerca de la utilización de rollizos de madera y barras de bambú en la construcción de mallas. Desde 1985, Pieter Huybers ha realizado una trascendente experimentación [1-77] acerca de las aplicaciones de los rollizos de pino y alarce holandeses en el campo de las estructuras espaciales, desarrollando una serie de sistemas de conexión en los extremos

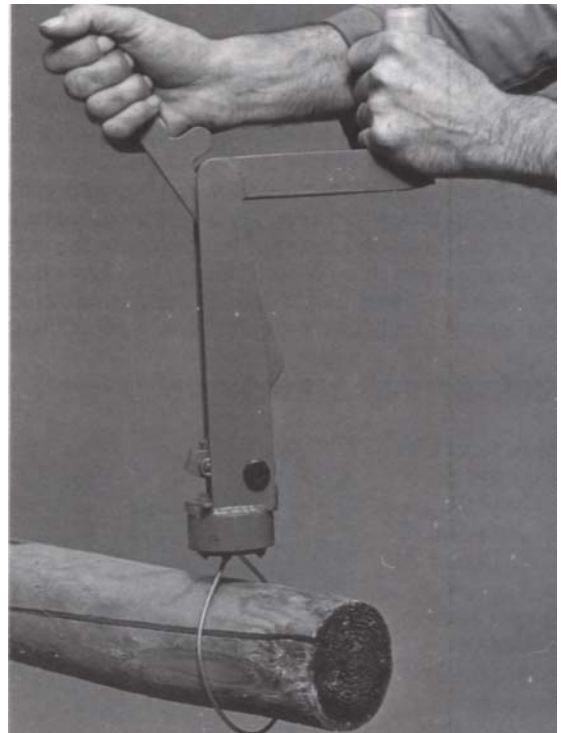
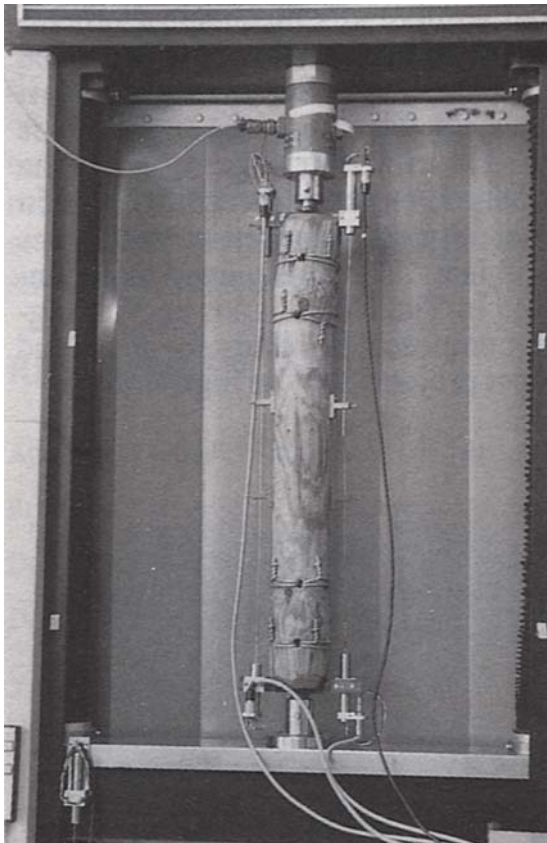


Ilustración I-78.- Útil para realizar el arrollamiento del alambre. P. Huybers. 1995

Ilustración I-77.- Ensayo de tracción.

Huybers plantea dos sistemas de conexión, introduciendo una pletina galvanizada en una ranura efectuada en los extremos del rollizo: en el primer sistema la pletina se une a la madera mediante un alambre galvanizado de 4mm. de espesor que se introduce en una serie de taladros realizados en función del espesor del rollizo, dándole vuelta posteriormente alrededor de la madera para lograr una adecuada transmisión de esfuerzos axiales.

En el segundo sistema la pletina se fija mediante la disposición de tornillos de alta resistencia a través de los taladros realizados en el rollizo, realizando posteriormente un zunchado exterior con alambre. El alambre en ambos casos se arrolla con fuerza al rollizo y se corta automáticamente con el útil de tensado [I-78]. La disposición del alambre tensado evita que la pieza de madera se rompa prematuramente, alcanzado en los ensayos [I-79] realizados para piezas de 200mm. de diámetro, cargas de rotura del orden de 300kN.

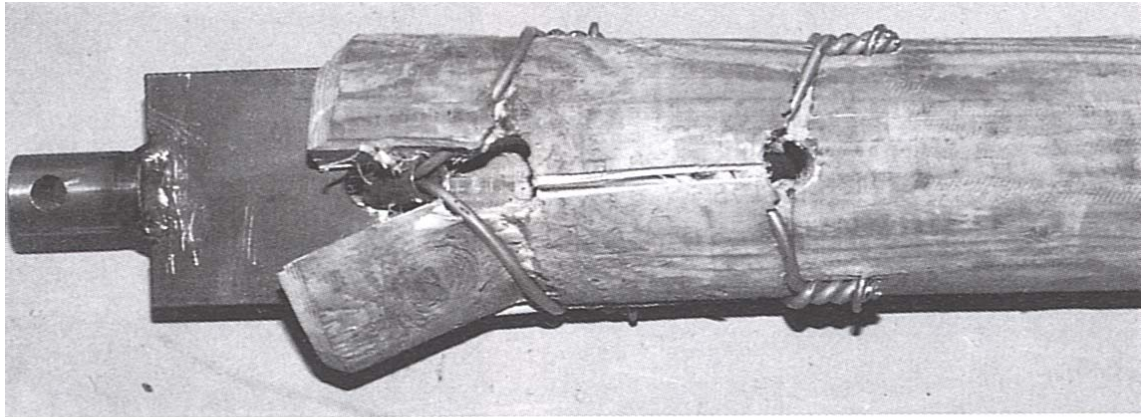


Ilustración I-79.- Ensayo de tracción. Obsérvese el zunchado realizado con alambre galvanizado.

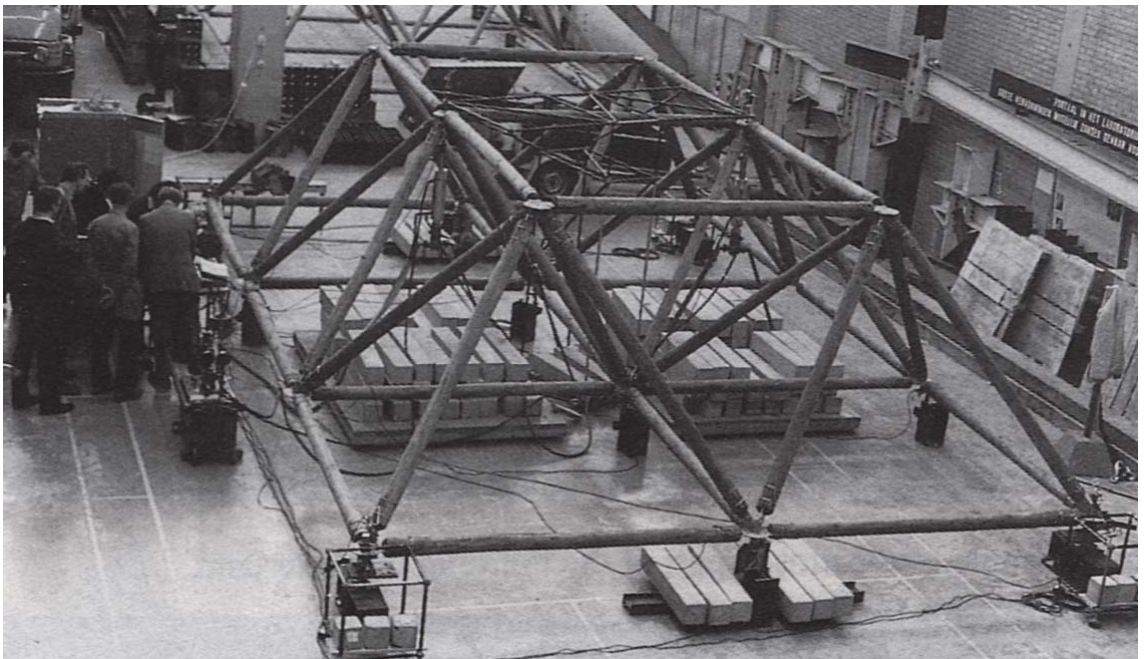


Ilustración I-80.- Ensayo de estructura a escala 1:1.

Las propuestas de P. Huybers se concretaron en la construcción de diversas estructuras espaciales, entre ellas cabe destacar la construcción de la cubierta de una guardería en Rotterdam en 1990. El edificio consta dos espacios claramente diferenciados: un primer espacio cerrado de dimensiones 13,37 m. x 11,46 m. en el cual la malla conformada por rollizos de alarce de 100mm., se apoya en todo su contorno [I-81, I-82] y un segundo espacio exterior de planta cuadrada de 11,46 m. de lado, en el que la malla espacial se apoya únicamente en cuatro soportes de hormigón armado [I-83 a I-85].

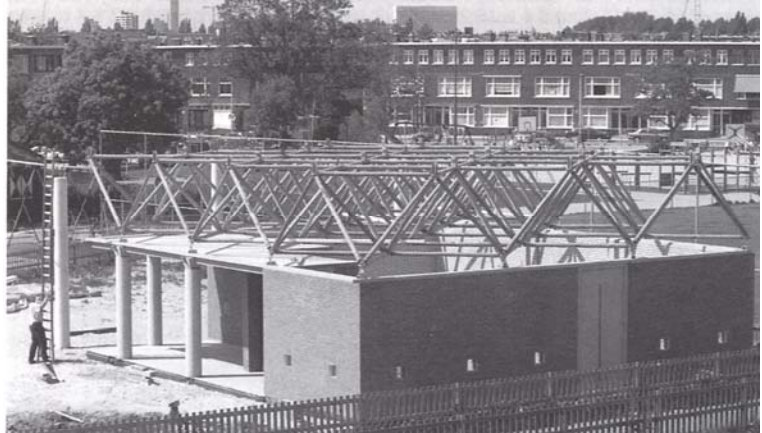


Ilustración I-81.- Vista exterior de la malla apoyada en todo su contorno P. Huybers. Rotterdam. 1990.

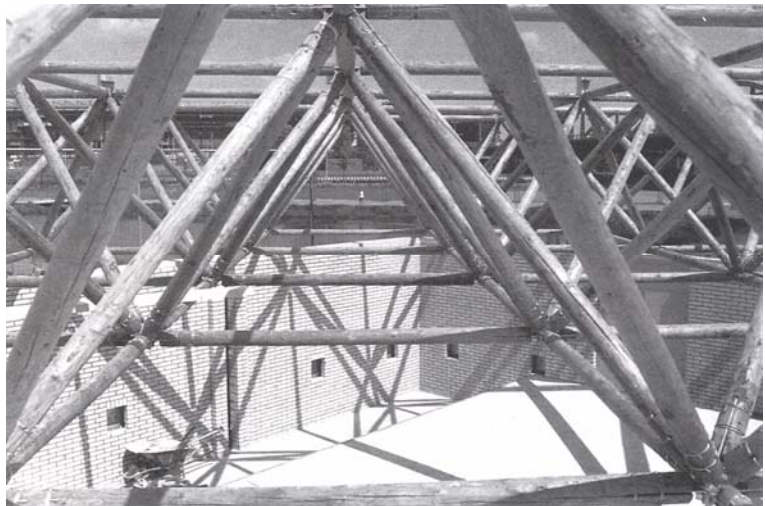


Ilustración I-82.- Detalle del entramado espacial de madera. Rotterdam. 1990.

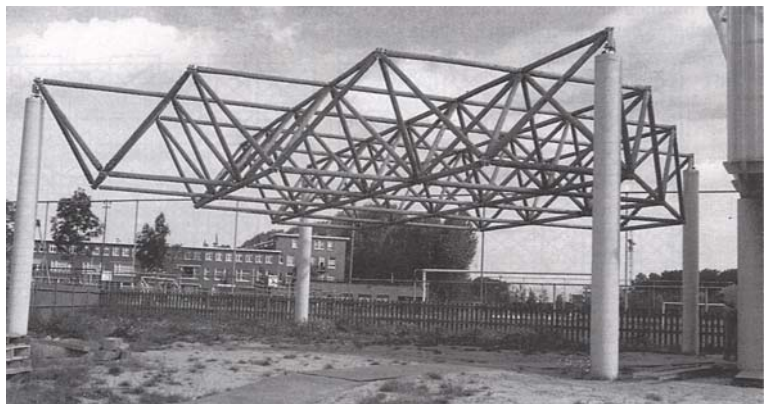
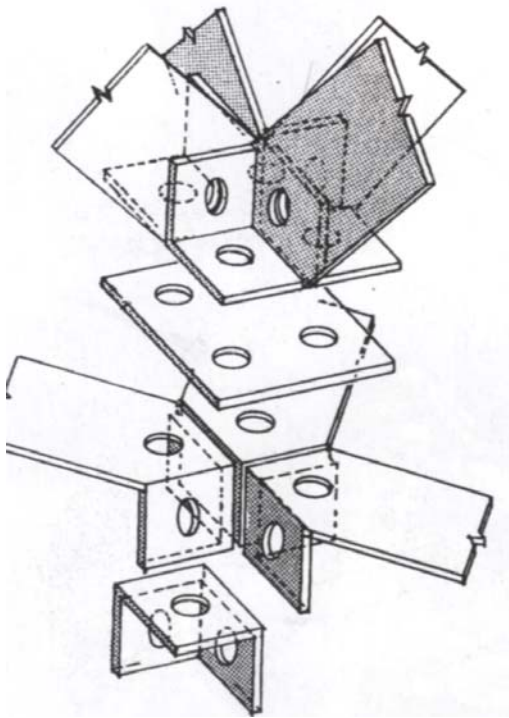
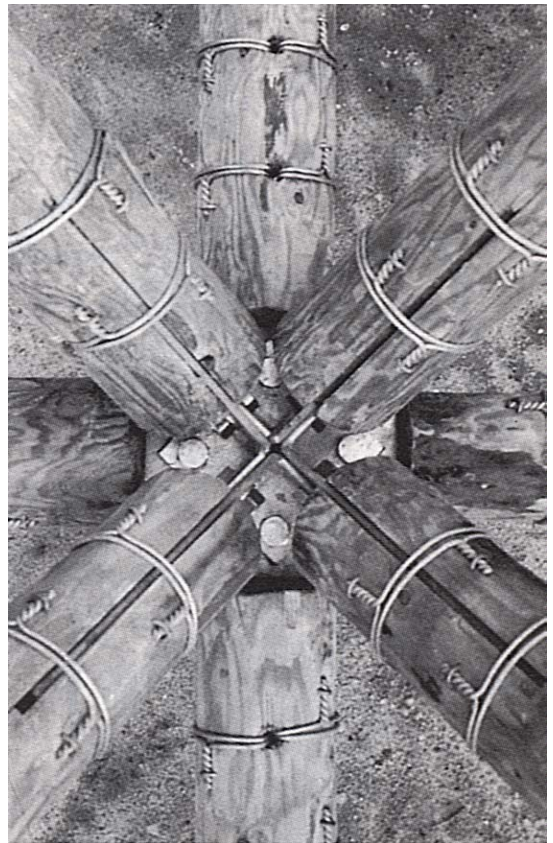


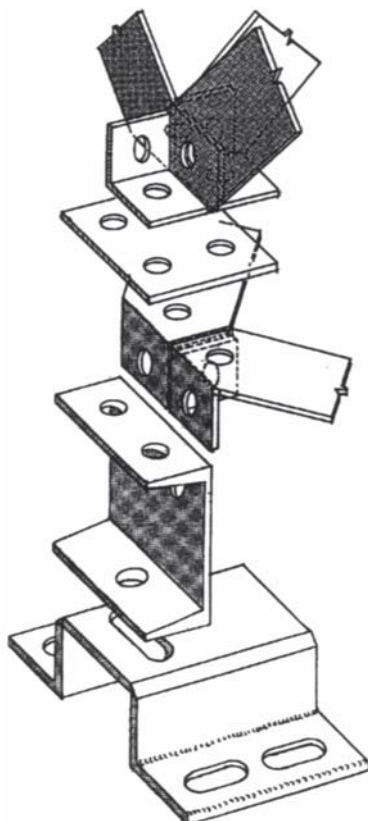
Ilustración I-83.- Vista de la malla exterior apoyada sobre cuatro soportes. Rotterdam. 1990.



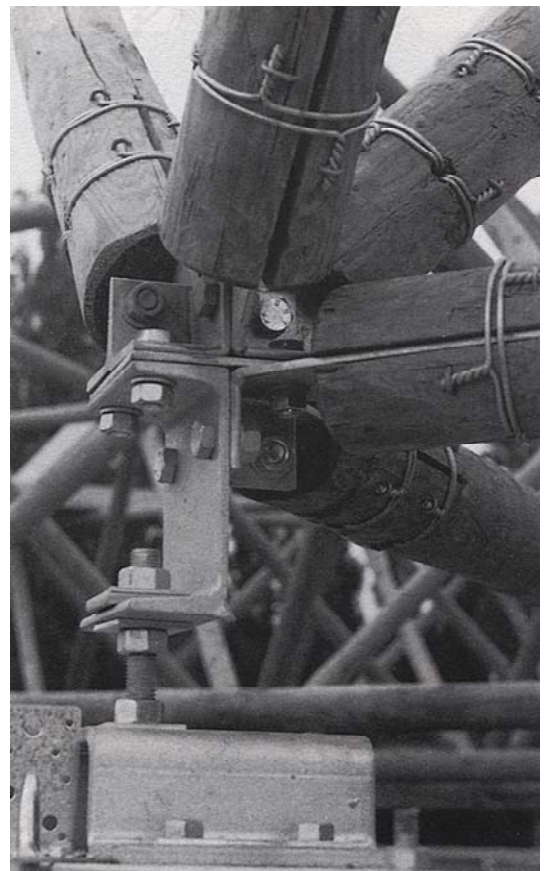
*Ilustración I-84.- Pletinas de conexión entre barras.
Rotterdam. 1990.*



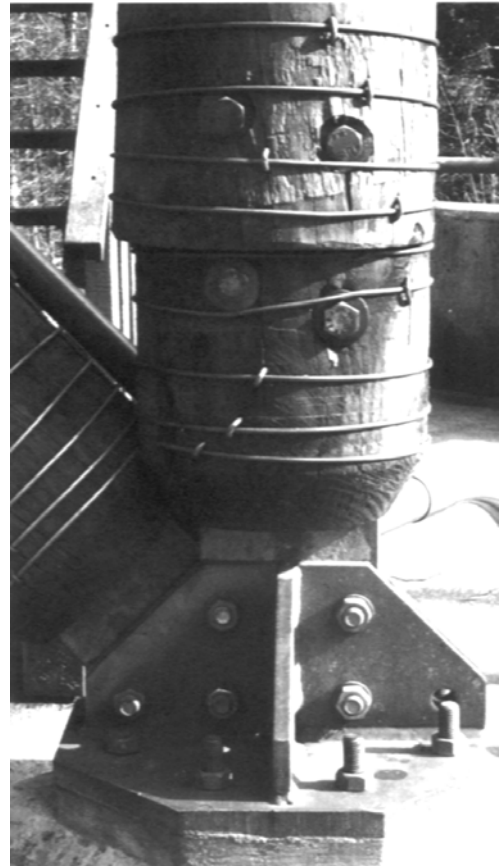
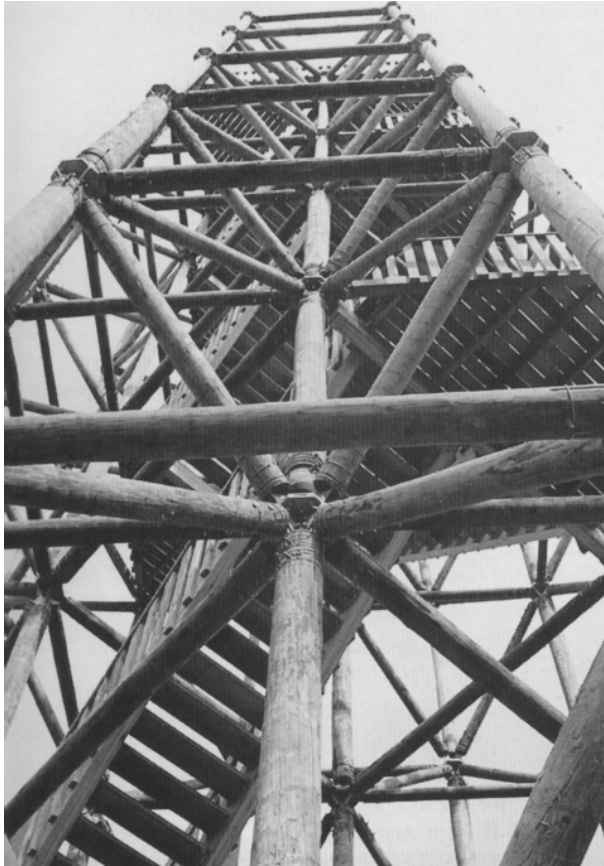
*Ilustración I-9.- Nudo inferior de malla.
Rotterdam. 1990.*



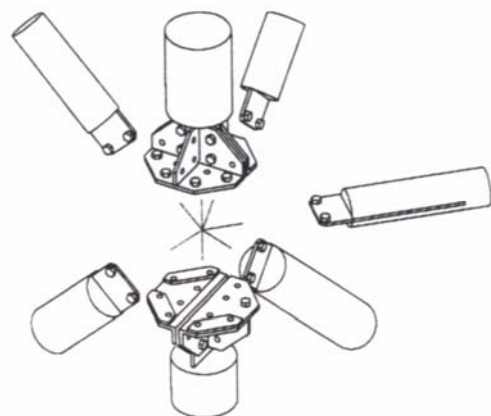
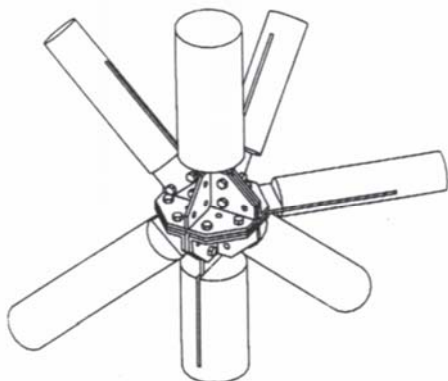
*Ilustración I-85.- Apoyo sobre soporte aislado de hormigón.
P. Huybers. Rotterdam. 1990.*



Otro ejemplo interesante, realizado en el año 1995 por P. Huybers, es la estructura de una torre panorámica construida en Apeldoorn, Holanda; se trata de un mirador de 27m. de altura ejecutado con rollizos de alarce de 110, 150 y 200mm. de diámetro. En el diseño del nudo extremo opta por la colocación de tornillos pasantes además del zunchado del extremo de barra tal y como se aprecia en las ilustraciones.



*Ilustración I-86.- Torre Panorámica en Apeldoorn. Detalle de apoyo.
P. Huybers 1995.*



*Ilustración I-87.- Torre Panorámica en Apeldoorn. Nudo de enlace de barras
P. Huybers 1995.*

En lo que respecta a las aplicaciones de las barras de bambú se han desarrollado una serie de estudios experimentales acerca sus aplicaciones a la tipología de mallas espaciales; este material aporta unas características naturales óptimas desde el punto de vista de su comportamiento ante esfuerzos axiales:

- Sección hueca que puede llegar a alcanzar los 30cm. de diámetro con espesores de pared del orden de 35mm.
- Notable rigidez, con un módulo de elasticidad en torno a 15.000N/mm^2
- Resistencia paralela a la fibra del orden de 150N/mm^2
- Peso específico alrededor de 880 kg/m^3

La tesis doctoral de Jansen J.J.A. leída en 1981 en la Universidad Tecnológica de Eindhoven, Holanda, "*Bamboo in Building Structures*" supuso el punto de partida para la utilización del bambú en este tipo de estructuras; posteriormente Ghavami, K. y Moreira, L.E. pertenecientes a las Universidades Católica Pontificia de Río de Janeiro y Federal de Minas de Belo Horizonte respectivamente, avanzan en el diseño de los enlaces de barras [1-88, 1-89]. El nudo propuesto, constituido por chapas de aluminio que se fijan en los extremos de las piezas con un sistema parecido al de P. Huybers, pero aplicado a una sección hueca, tiene el inconveniente de su reducida capacidad portante con lo que se reducen las posibilidades de utilización de este material natural.

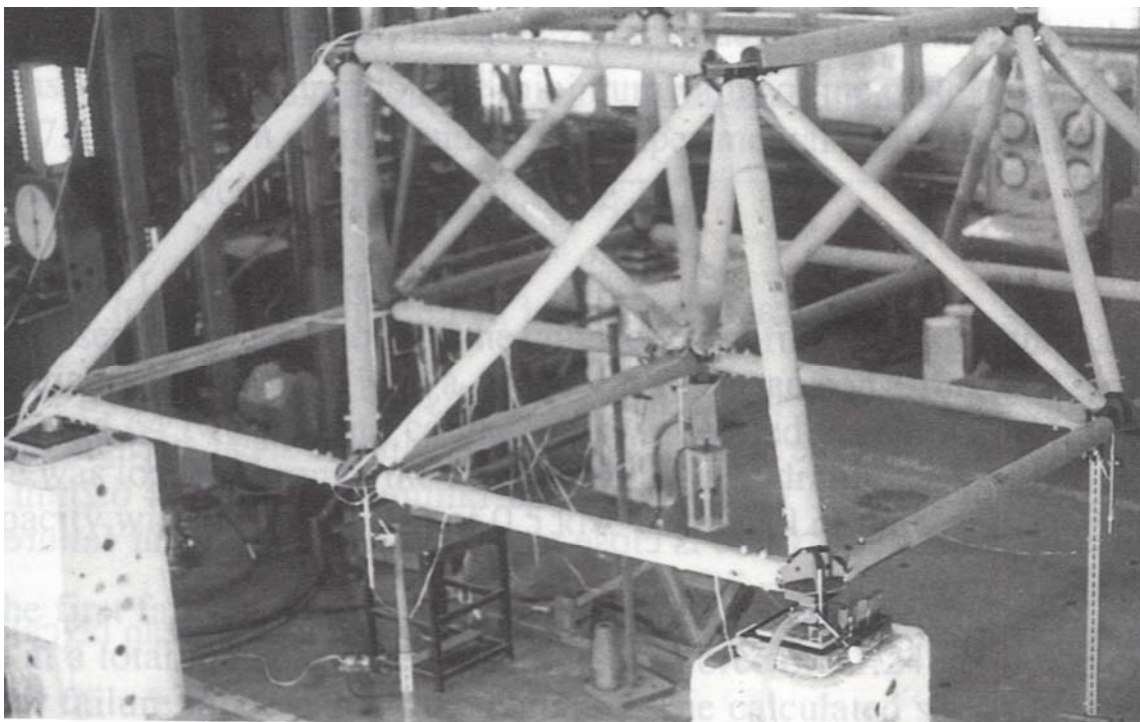


Ilustración I-88.- Modelo de malla espacial de bambú.
Ghavam, K. y Moreira, L.E. 1993.

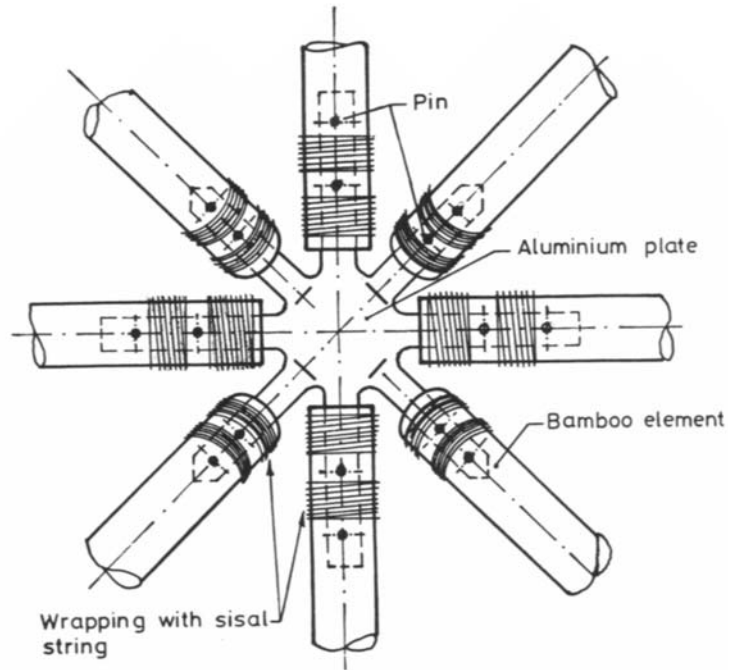


Ilustración I-89.- Nudo de enlace de barras de bambú. 1993.
Ghavami, K y Moreira, L. E. .

Además de los antecedentes señalados, existen una gran variedad de diseños de extremo de barra, entre los que cabe destacar las variantes del sistema MERO para estructuras de madera laminada [I-90, I-91] y los diferentes diseños realizados por LIGNUM.

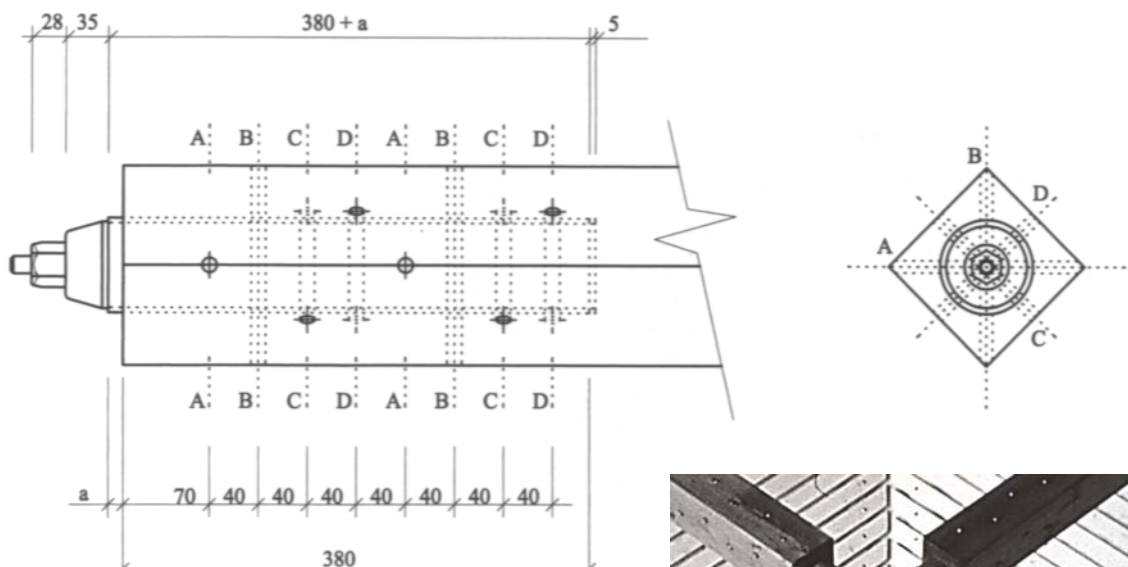


Ilustración I-90.- Nudo extremo para barras laminadas.
sistema MERO.



Ilustración I-91.- Iglesia de Reutlingen. Alemania. 1984

Quizás la construcción de una sala polivalente en Arbón, en Suiza, [I-92, I-93] con una planta libre de 27x45m., fue la primera aplicación a gran escala de una investigación que abrió nuevas posibilidades formales al diseño estructural en madera. LIGNUM desarrolló un nudo tetraédrico, constituido por una esfera central de hierro forjado de 80N de peso, y una horquilla metálica introducida en la sección de madera laminada de haya, enlazada a esta mediante pasadores de pequeño diámetro.

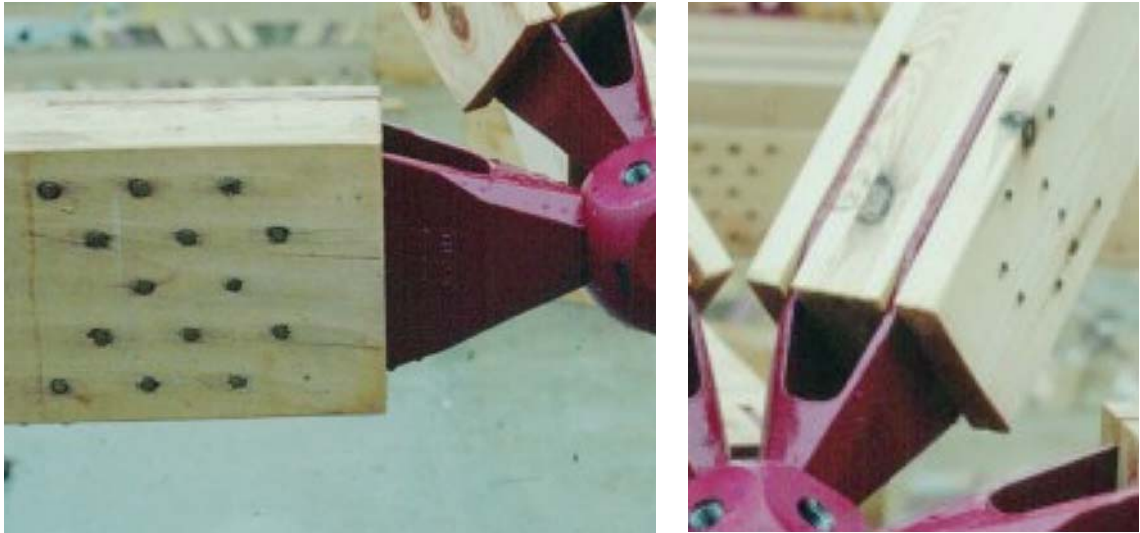
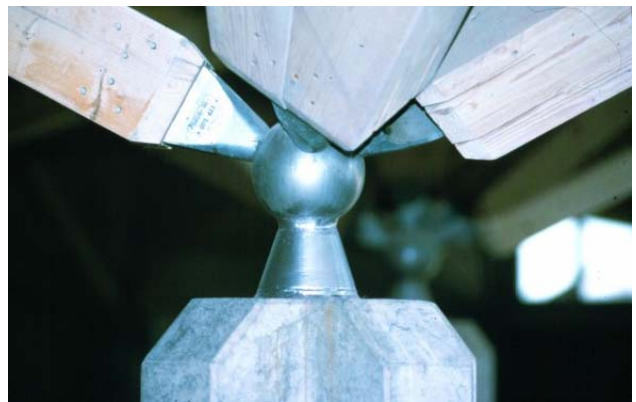


Ilustración I-92.- Nudo extremo para barras laminadas, sistema LIGNUM-VARITEC.



Ilustración I-93.- Sala Polivalente en Arbón. Suiza
1985.

Otra aplicación del nudo de enlace desarrollado por LIGNUM. se utiliza para la construcción de la malla espacial de la iglesia de “St Katharina von Siena”, construida en el año 1991, en Fällanden, Zurich [I-94] .En esta ocasión se dispone una pequeña esfera maciza como nudo de enlace de las barras de madera laminada encolada.



*Ilustración I-94.- Iglesia de St. Katharina
von Siena. 1991
Fällanden, Zurich. Suiza.
Architect: Peter Brader.*

Asimismo existen numerosas soluciones para resolver el encuentro de las barras en mallas de una capa; una muestra de ello es el sencillo nudo de enlace utilizado en la construcción de la cúpula geodésica del delfinarium de Brugge, Bélgica en el año 1990, con un diámetro de 64 metros y un gálibo de 17m.. Los extremos roscados de pernos embebidos en la madera abrazan pletinas metálicas que se aprietan contra el cilindro central. [I-95, I-96]



*Ilustración I-95.- Detalle de Nudo
Delfinarium de Brugge. 1990.*



*Ilustración I-96.- Montaje de la malla espacial.
Delfinarium de Brugge. 1990.*

Recordando las piezas de conexión que el ingeniero español Betancourt diseñó en el puente de Kamennooostrovskii [I-40], el arquitecto Roger Taillibert diseña un pequeño conector hexagonal para la construcción de la malla espacial de cubierta de la piscina en Nogent sur Oise, Val de Marne. [I-97, I-98, I-99]



Ilustración I-97.- Piscina Cubierta. Nogent sur Oise, Val de Marne. 1995.



Ilustración I-98.- Detalle de Nudo
Nogent sur Oise, Val de Marne. 1995.

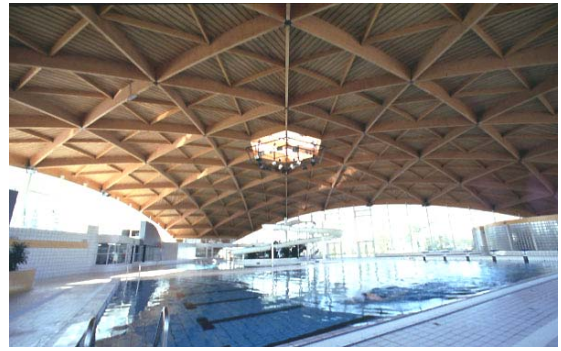


Ilustración I-99.- Vista interior de la malla.
Nogent sur Oise, Val de Marne. 1995.

En 1988, el arquitecto Shoeni Yoh construye en el sur de Japón el gimnasio Oguni Dome [I-100]. Se trata de una malla espacial de doble capa y doble curvatura, constituida por barras de sección maciza. En cada extremo de la barra se dispone un conector de acero compuesto por un cilindro de 42,7 mm. de diámetro y un perno roscado en el nudo de enlace de barras.

El conector de acero se fija a la barra maciza de madera mediante la disposición de dos tornillos de 16mm. de diámetro y la inyección de adhesivo epoxi a través de unos pequeños taladros tal como se aprecia en la ilustración.

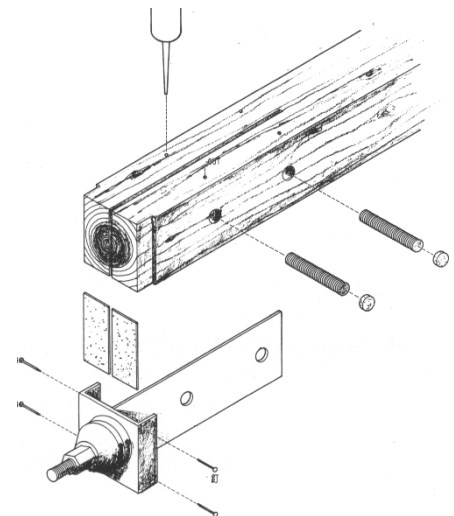


Ilustración I-100.- Nudo extremo para barra de sección maciza. Oguni Dome. Yoh Architects. 1988.

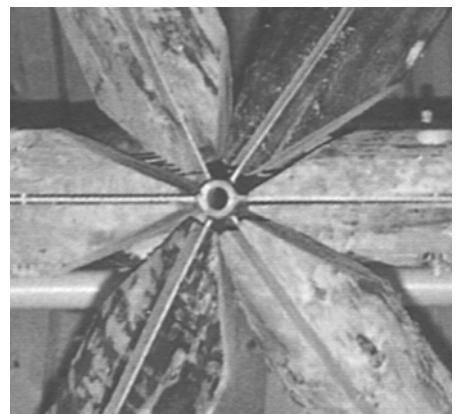
Los ejemplos anteriores muestran la adopción por parte de las mallas espaciales de madera de soluciones utilizadas habitualmente en las mallas de acero. Como ya sucedió en la Grecia clásica cuando la piedra mimetizaba las antiguas construcciones de madera, el nuevo material adquiere su propia expresividad con el paso del tiempo y hasta que esto ocurre tiende a imitar las soluciones constructivas existentes.

La estructura del Ayuntamiento de Lege-Cap Ferret [I-101] en la costa atlántica francesa, aporta una alternativa a las soluciones de nudo de enlace basadas en la esfera, disponiendo una serie de pletinas metálicas de 8mm. de espesor y 40mm. de ancho dispuestas en el extremo de las barras.



Ilustración I-101.- Estructura de cubierta. Ayuntamiento de Lege-Cap Ferret. Francia. 1993.

La misma solución aunque menos académica se utiliza en la construcción del entramado de cubierta del pabellón de acceso al parque de atracciones de Kaatsheuvel en Holanda, [I-102] compuesto por rollizos de diámetros variables entre 400 y 650mm. Los nudos se realizan mediante tubos a los que se sueldan pletinas bulonadas en la madera.



*Ilustración I-102.- Estructura de cubierta y detalle de nudo de enlace
Pabellón de entrada al parque de atracciones de Kaatsheuvel. Holanda. 1995.*

II.- BARRAS HUECAS DE MADERA.

1.- DISEÑO DE BARRAS.

En el apartado de antecedentes dedicado a las mallas de madera se ha mostrado como los ejemplos construidos y las investigaciones desarrolladas han utilizado básicamente tres tipos de piezas: los rollizos de madera maciza, las barras de bambú y las secciones macizas de madera laminada.

Los rollizos presentan el importante inconveniente de su baja calidad y su reducida capacidad portante, lo que limita su empleo a obras de tipo menor, generalmente de uso industrial, en las que no se demanda una elevada calidad de acabado. El bambú, por el contrario, aporta unas elevadas prestaciones como material estructural pero una de sus principales ventajas, su disponibilidad natural se convierte en uno de sus principales inconvenientes, debido a que la forma y dimensiones de su sección no son necesariamente las requeridas o deseadas, sino las disponibles. En ese sentido, la utilización del bambú nos retrotrae a la época de la madera aserrada, donde el material establece una fuerte restricción a la libertad en el diseño de los elementos. Finalmente, el tercer grupo está constituido por las secciones en madera laminada, casi siempre de sección cuadrada, raramente de sección rectangular, pero siempre de sección maciza.

En este contexto, el Departamento de Tecnología de la Construcción, con el que el firmante de la presente tesis siendo alumno de cuarto curso de arquitectura disfrutaba de una beca de colaboración concedida por la Universidad de La Coruña, inicia una línea de investigación dirigida por D. Fco. Javier Estévez Cimadevila, con respecto a la utilización de la madera laminada en las estructuras espaciales. Esta línea se concreta a finales de 1991 en un proyecto de investigación financiado por la Universidad de A Coruña de título “ESTRUCTURAS ESPACIALES DE MADERA LAMINADA PARA USOS ARQUITECTÓNICOS”.

En esas fechas comienza una búsqueda de antecedentes para conocer el estado del arte en este campo. Sorprendentemente, la búsqueda resultó casi infructuosa, tanto en lo relativo a trabajos de investigación como en la localización de ejemplos construidos. Estos últimos estaban constituidos fundamentalmente por mallas de una capa, que no eran objeto de la investigación, y únicamente la cubierta de una sala polivalente en Arbón, Suiza, mostraba una aplicación significativa de la madera laminada en una malla de doble capa [III-16]. Ahora bien, tal y como ya se ha señalado, todos los ejemplos tanto de mallas de una capa como con dos planos de cordones tienen un denominador común: el empleo de piezas de sección maciza.

La utilización de secciones macizas en la conformación de mallas espaciales presenta importantes desventajas:

- ❑ Limita la longitud de las barras a emplear pues, en caso contrario, el pandeo penaliza de forma muy notable el rendimiento a compresión de las barras.
- ❑ La limitación en la longitud de las barras conlleva una menor dimensión de los módulos y, en consecuencia, un incremento notable del número de nudos de la estructura. En el caso de una malla de semioctaedros, prescindiendo de la incidencia de los bordes, el número de nudos tiende a incrementarse con el cuadrado del lado del módulo. Dado que el número de nudos tiene una incidencia relevante en el coste final de la estructura, la anterior limitación de la longitud de los elementos entraña un aumento de la complejidad de la construcción y de su coste.
- ❑ Alternativamente a la vía de aumentar el número de nudos, se puede optar por el empleo de piezas largas comprimidas con secciones robustas, aún a costa de reducir su rendimiento. No obstante, este criterio presenta varios inconvenientes: en primer lugar las piezas de madera con secciones transversales de dimensión gruesa son mucho más sensibles a las variaciones dimensionales por cambios en los factores medio ambientales; estas variaciones pueden ser la causa de la formación de fendas, de la deformación de la pieza curvándose o abarquillándose, de desajustes en las uniones, etc.; en segundo lugar, la protección frente a ataques de origen biótico es menos eficiente; por último la incidencia de los defectos de la madera es mayor cuanto más grandes sean las dimensiones de las tablas empleadas en el laminado de la pieza.

Teniendo en cuenta los inconvenientes citados la investigación derivó hacia la posibilidad de conformar secciones huecas en madera laminada, permitiendo aprovechar las ventajas inherentes a la madera laminada, mediante el laminado de barras de sección considerable a partir de piezas de pequeña dimensión, lo que sin duda minimiza la incidencia de las imperfecciones del material en la sección.

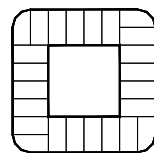
De esta forma se consiguen elevados radios de giro con un mínimo aporte de material; en definitiva, se mejora notablemente el rendimiento resistente frente a la sollicitación de compresión.

La utilización de espesores reducidos disminuye la incidencia de los cambios dimensionales de origen húmedico, al homogeneizar el estado higrotérmico en todo el material. El carácter hueco de la sección facilita además, la realización de un eficaz tratamiento integral de la madera frente a los agentes bióticos.

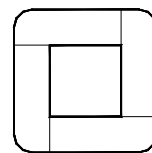
En un principio, el equipo investigador planteó diversas posibilidades en cuanto a la forma de obtención de una sección hueca. Desde un punto de vista formal, se barajaron varias alternativas:

SECCIÓN HUECA CUADRADA O RECTANGULAR

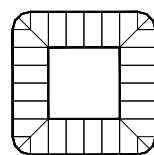
Se considera apta para cualquier tipología de malla, siendo especialmente adecuada en la malla de semioctaedros. Se han planteado dos variantes para el laminado de las esquinas, alternando caras o ingleteándolas. Tal y como se verá en el apartado del estudio experimental, dichas variantes, aún cuando presentaron patrones de rotura ligeramente diferentes, no han mostrado grandes diferencias en cuanto a capacidad de carga. Por dicha razón, se ha optado por la solución A que aúna una mayor facilidad de fabricación con un menor desperdicio de material.



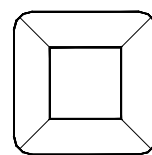
A



B



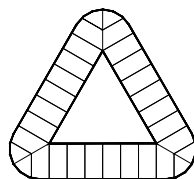
C



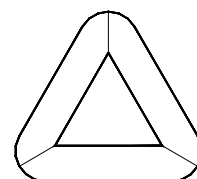
D

SECCIÓN HUECA TRIANGULAR

Puede constituir una alternativa interesante en la construcción de mallas tetraédricas. Su principal inconveniente es de tipo constructivo, dadas las dificultades que entraña la ejecución de la pieza, especialmente desde el punto de vista de ejercer una presión uniforme en las caras para garantizar un correcto encolado de la barra.



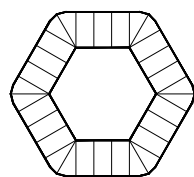
E



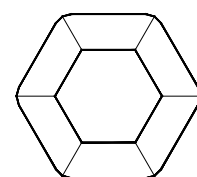
F

SECCIÓN HUECA HEXAGONAL

Se trata de una solución planteada con el objetivo de mostrar las posibilidades de la madera laminada en la conformación de secciones huecas, si bien una vez analizado el binomio facilidad de ejecución-rendimiento, se encuentra en inferioridad de condiciones frente a las otras alternativas.



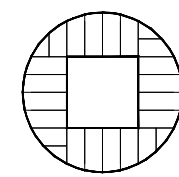
G



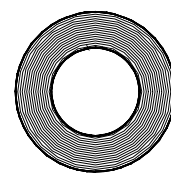
H

SECCIÓN HUECA CIRCULAR

Desde un punto de vista mecánico, obviamente las secciones circulares son las más interesantes. Sin embargo, esta afirmación debe ponerse en relación con las dificultades de enlace que presentan estas formas y que puede hacer variar lo que en principio parecería que no admite discusión.



I



J

Ilustración II-1.- Secciones tipo.

Para la sección circular se han planteado dos alternativas: la primera de ellas, con espesor de pared variable, aporta la ventaja de un intradós cuadrado lo que puede facilitar el enlace con el nudo; por el contrario, la forma de laminado implica el desbastado de la sección cuadrada hasta llegar a la forma circular, lo que supone un desperdicio de material que hace que su mayor rendimiento sea simplemente teórico, además de incrementar el número de operaciones para su ejecución y, en definitiva, su coste. La otra alternativa planteada, si bien no ha sido desarrollada por las dificultades que entrañaba la ejecución de prototipos, puede ser una alternativa sumamente interesante, pues su conformación dentro de un proceso industrializado es muy sencilla. La sección se obtiene por enrollamiento de chapa alrededor de una “plantilla” bien permanente o perdida, como podría ser un tubo de cartón, o temporal como una pieza metálica extraíble.

Es importante señalar que, tal y como se aprecia en las ilustraciones de la página anterior, se ha previsto la alternativa de conformar las secciones huecas mediante encolado de las caras del prisma con tablas completas. Dicha alternativa abre una nueva línea de investigación de desarrollo futuro en lo que se refiere a la conformación de la sección con tableros estructurales microlaminados de tipo LVL lo que constituye una opción de enorme interés. Se descarta la utilización de tablas de madera maciza ya que el laminado quedaría limitado a secciones de pequeña dimensión puesto que, en caso contrario, podría producirse el abarquillamiento de las caras debido a la diferencia existente entre la contracción radial y tangencial que se origina en las tablas de ancho importante con los cambios higrotérmicos.

Por último, señalar que a pesar de las notables ventajas que aportan las secciones huecas frente a las macizas, ello no se traduce en una ejecución compleja; antes bien, su conformación dentro de un proceso industrial es notablemente sencilla, pues se reduce al laminado de piezas rectangulares de ancho 3 ó 4 veces superior al espesor de la pared de la sección hueca para que, una vez obtenidas las caras por simple corte, proceder al encolado de las mismas contra una pieza maestra o guía y así conformar la pieza definitiva. En consecuencia, la manipulación que se precisa es reducida, con lo que el coste de fabricación resulta competitivo.

Dado el carácter novedoso de la propuesta, el equipo investigador compuesto por Fco. Javier Estévez Cimadevila, R. Vázquez Fernández y Javier Álvarez Pablos, solicitó su patente en Junio de 1993, patente concedida en Noviembre de 1997 con el número 93012185 bajo el título ESTRUCTURA PLANA O ESPACIAL DE BARRAS DE SECCIÓN HUECA DE MADERA LAMINADA ENCOLADA.

2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL.

Al objeto de contrastar experimentalmente el comportamiento de las piezas huecas de madera, se procedió a la realización de una campaña de ensayos con probetas de madera realizadas en abeto (*Picea abies*). La elección de esta especie de madera se fundamentó en que es una de las más comúnmente empleadas en el laminado de piezas.

La primera cuestión que se suscitó en la ejecución de los ensayos era la determinación del tamaño de la probeta y el procedimiento operativo en cuanto a la velocidad de carga a aplicar. Las normas existentes en España, en aquel momento, para este tipo de ensayos eran:

- UNE 56-55-77.-“Determinación de la resistencia a compresión axial”
- UNE 56-528-77.-“Características físico-mecánicas de la madera.
Preparación de probetas para ensayo”.

De acuerdo con las citadas normas, las probetas han de tener forma de prisma cuadrangular de sección recta de 20 mm. de lado y altura paralela a la dirección longitudinal de las fibras de 60 mm. La velocidad de carga se establece en un umbral de 200 a 300 Kg/cm² por minuto.

El problema que plantea la aplicación de las normas UNE es que dichas normas están pensadas para el ensayo de piezas de sección maciza, pero no son aplicables en casos como el presente donde las piezas tiene sección hueca pues, aparte de que no es factible la confección de secciones huecas de 20 mm. de lado, los resultados no serían fiables por la enorme incidencia que tendría cualquier tipo de desperfectos en la sección. En consecuencia, tras la consulta de otras normas, se adoptó el criterio de aplicar la Norma **CEN-TC 124** que establece unos criterios mucho más genéricos, válidos para su aplicación a cualquier tipo de sección. Dicha norma establece una luz libre, medida paralelamente a la dirección longitudinal de las fibras, de valor 6 veces el ancho nominal de la probeta; si la pieza ensayada supera dicha longitud, deberán disponerse acodalamientos a separación no superior a 6 veces la menor dimensión de la sección, al objeto de evitar la incidencia del pandeo en el valor de la carga de rotura. Asimismo establece una velocidad de carga por recorrido dada por la expresión:

$$V_r = 5 \cdot 10^{-5} \cdot L$$

V_r velocidad de carga en mm/seg.
 L luz de la probeta en mm.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña, empleando una máquina modelo M-4 de Suzpecar. La razón para el empleo de esta máquina, cuya finalidad es la realización de ensayos de flexión, en lugar de la destinada específicamente a los ensayos a compresión simple, se debe a que el recorrido de pistón disponible en esta última imposibilitaba el ensayo de piezas largas, de gran interés para observar el comportamiento de las piezas huecas frente al pandeo.

Se realizaron tres campañas de ensayos:

1ª CAMPAÑA DE ENSAYOS

Consistió en el ensayo a compresión simple sobre 6 probetas macizas de 60x60 mm². y 360 mm. de luz libre. Dicho ensayo tenía por objeto la determinación de las características mecánicas de la madera que luego se empleó en la confección de las probetas huecas. La velocidad de recorrido del pistón se estableció, de acuerdo con CEN-TC 124, en:

$$V_r = 5 \cdot 10^{-5} \cdot L = 0,018 \text{ mm/seg.}$$

Dado que en el módulo de carga de la máquina de ensayos, la velocidad había que determinarla en Kg/seg., se realizó la conversión suponiendo un módulo de elasticidad paralelo medio de 11 kN/mm²., que es el correspondiente a la clase resistente empleada. En consecuencia, la velocidad de carga V_c queda:

$$V_c = \frac{V_r \cdot E \cdot A}{L} = \frac{0,018 \text{ mm/seg} \cdot 11 \text{ kN/mm}^2 \cdot 3600 \text{ mm}^2}{360 \text{ mm}} = 1,98 \text{ kN/seg}$$

Podemos observar que el valor de la velocidad de carga, en el caso de la probeta maciza, es ligeramente superior al valor máximo establecido por UNE 56-535-77 que, en el caso presente, correspondería a 180 Kg/seg.

2ª CAMPAÑA DE ENSAYOS

Se realizó sobre 6 probetas huecas de 60 mm. de lado, 10 mm. de espesor y 360 mm. de luz libre.

En este caso, la velocidad de carga se estableció en los siguientes valores:

$$V_r = 0,018 \text{ mm/seg.} \quad V_c = 1,1 \text{ kN/seg.}$$

3ª CAMPAÑA DE ENSAYOS

Por último, se realizó una nueva campaña de ensayos sobre 6 probetas huecas de 60 mm. de lado, 10 mm. de espesor y 1.400 mm. de luz libre. La longitud de la pieza se estableció en 1.400 mm. por dos razones: en primer lugar, por las limitaciones impuestas por la máquina de ensayos al recorrido libre del pistón; en segundo lugar, para realizar el ensayo sobre piezas cuya esbeltez fuese del mismo orden de magnitud de las que se emplearían en un caso práctico, al objeto de ver el comportamiento de las mismas teniendo en cuenta la incidencia del pandeo. Por esta razón, estos ensayos se realizaron sin ningún tipo de acodalamiento de las probetas

Al objeto de garantizar una articulación perfecta de los extremos de las barras, se construyeron unos casquillos esféricos que permitían el libre giro en cualquier dirección, al tiempo que se impedía el desplazamiento de los extremos de la barra durante el pandeo de la misma.

Para la velocidad de carga se adoptaron los siguientes valores:

$$V_r = 0,07 \text{ mm/seg.} \quad V_c = 1,1 \text{ kN/seg.}$$

Los ensayos realizados sobre probetas macizas se recogen en las curvas carga-deformación obtenidas mediante el programa ENSAYO, desarrollado por el doctor arquitecto D. Javier Álvarez Pablos, para la captación de las mediciones realizadas por la máquina. Dichas gráficas muestran unos valores de carga en rotura de magnitud muy similar, con los siguientes resultados:

Valor medio de carga	N_m	=	113,07 kN.
Valor característico de carga	N_k	=	107,97 kN.
Valor característico de tensión	$f_{c,0,k}$	=	30 N/mm ² .

Se trata de resultados muy buenos tanto por la magnitud alcanzada como por la baja dispersión; no obstante, dado el reducido número de muestras ensayadas, no puede establecerse una correspondencia entre el valor característico de tensión, obtenido suponiendo una distribución estadística normal, y una clasificación resistente que exigiría analizar una población mucho mayor.

Las ilustraciones que acompañan las gráficas de carga muestran la forma de rotura de las probetas poniendo de manifiesto la gran incidencia que tiene en la misma el tipo de enlace empleado. No obstante, la comparación entre las probetas apoyadas directamente sobre una chapa y las enlazadas por medio de la articulación esférica muestran que dicha incidencia solamente afecta al patrón de rotura, sin que tenga repercusión apreciable en el valor de carga para el que se produce.



Ilustración II-2.- Probetas de madera maciza.

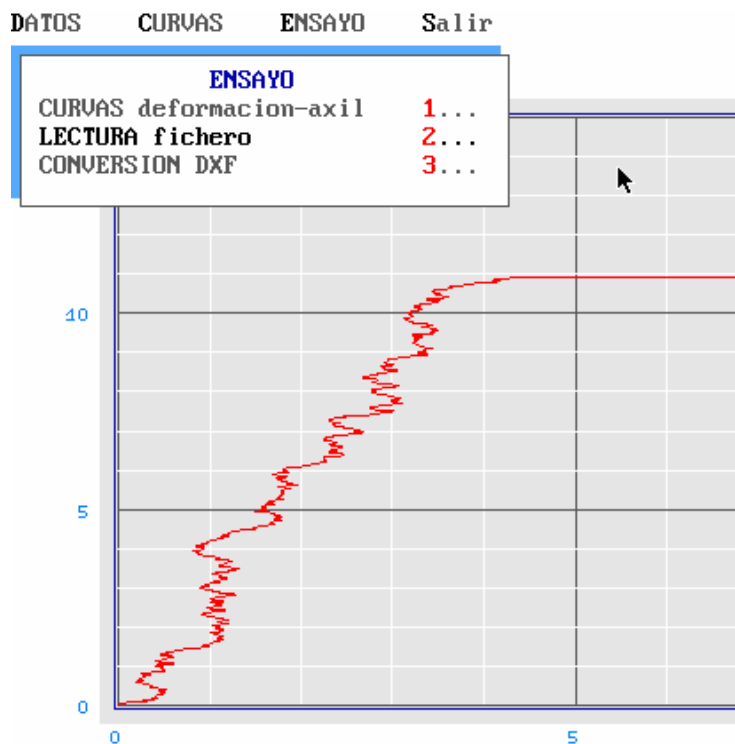


Ilustración II-3.- Probeta 1. Gráfica carga-acortamiento.

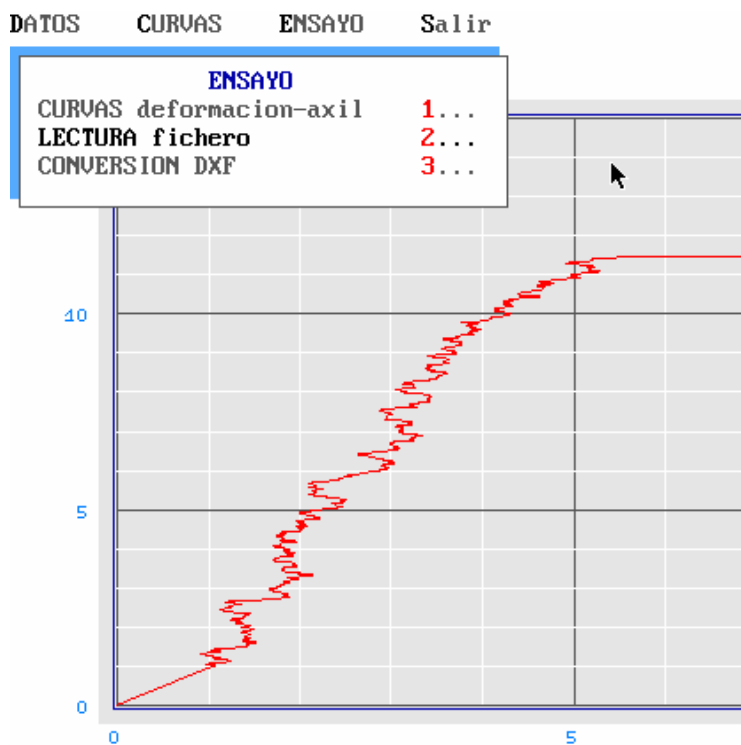


Ilustración II-4.- Probeta 2. Gráfica carga-acortamiento.



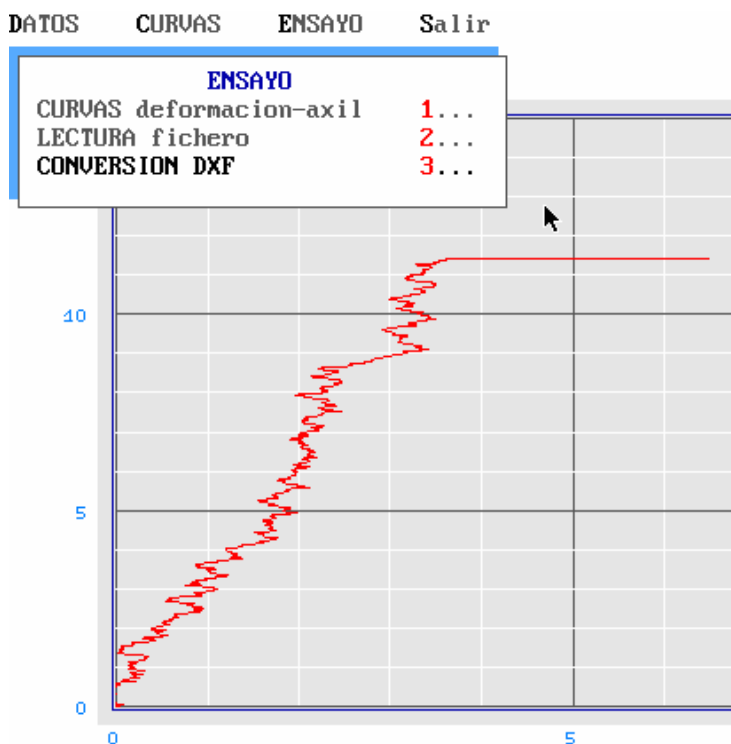


Ilustración II-5.- Probeta 3. Gráfica carga-acortamiento.

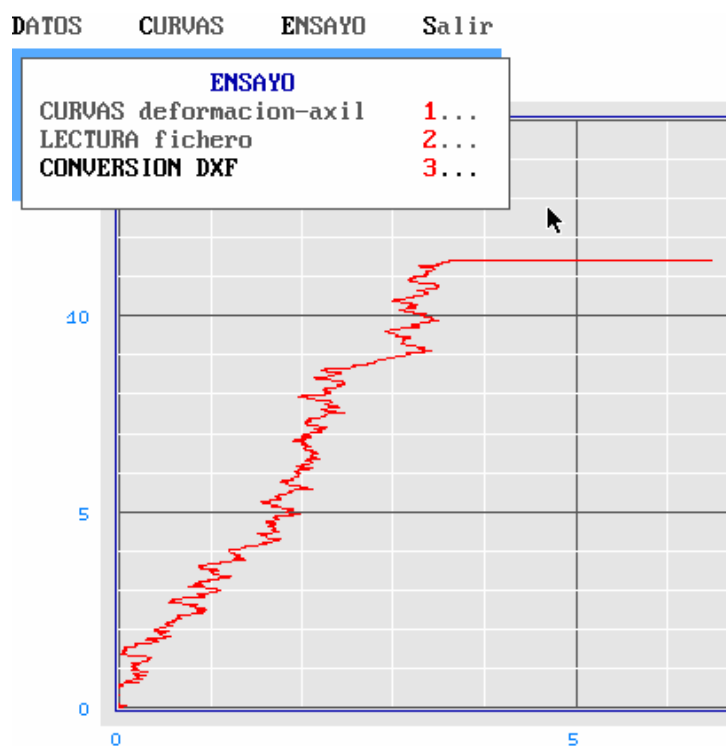
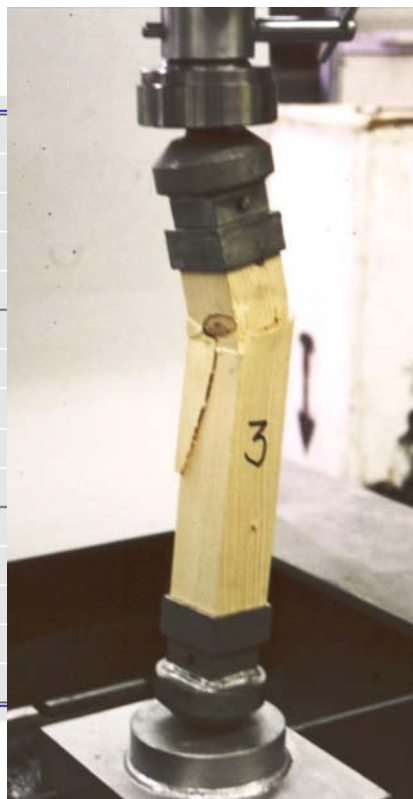


Ilustración II-6.- Probeta 4. Gráfica carga-acortamiento.



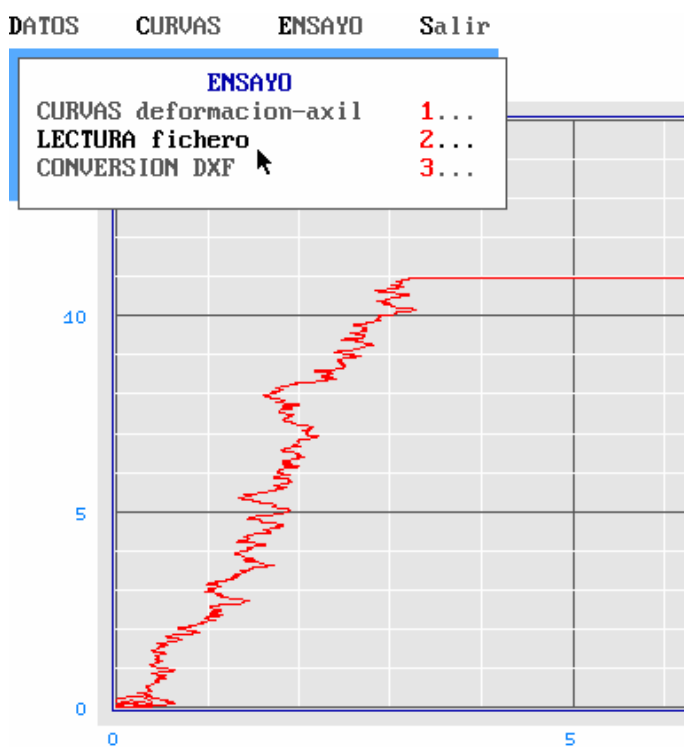


Ilustración II-7.- Probeta 5. Gráfica carga-acortamiento.

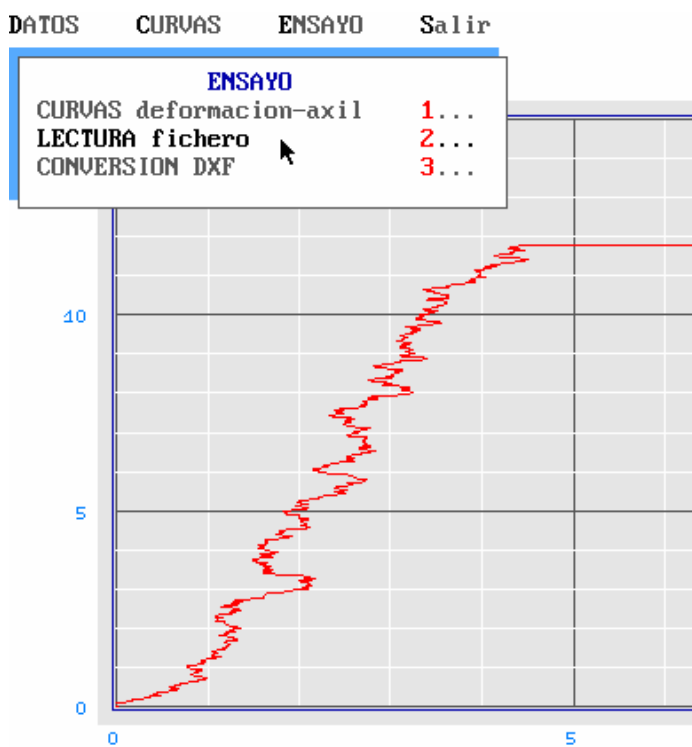
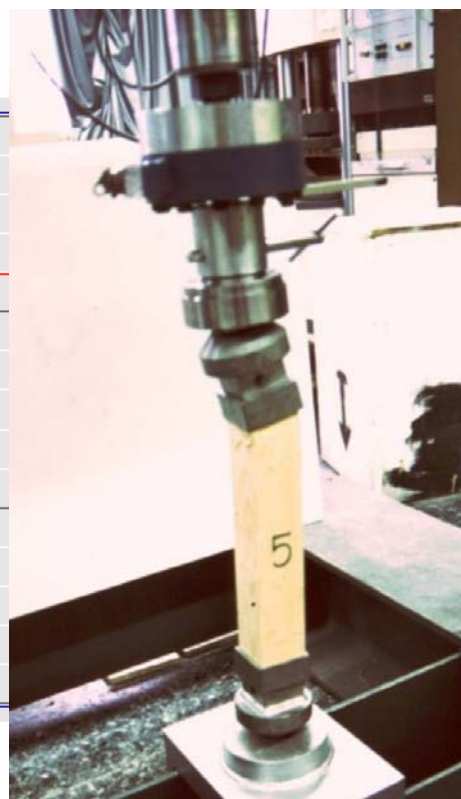
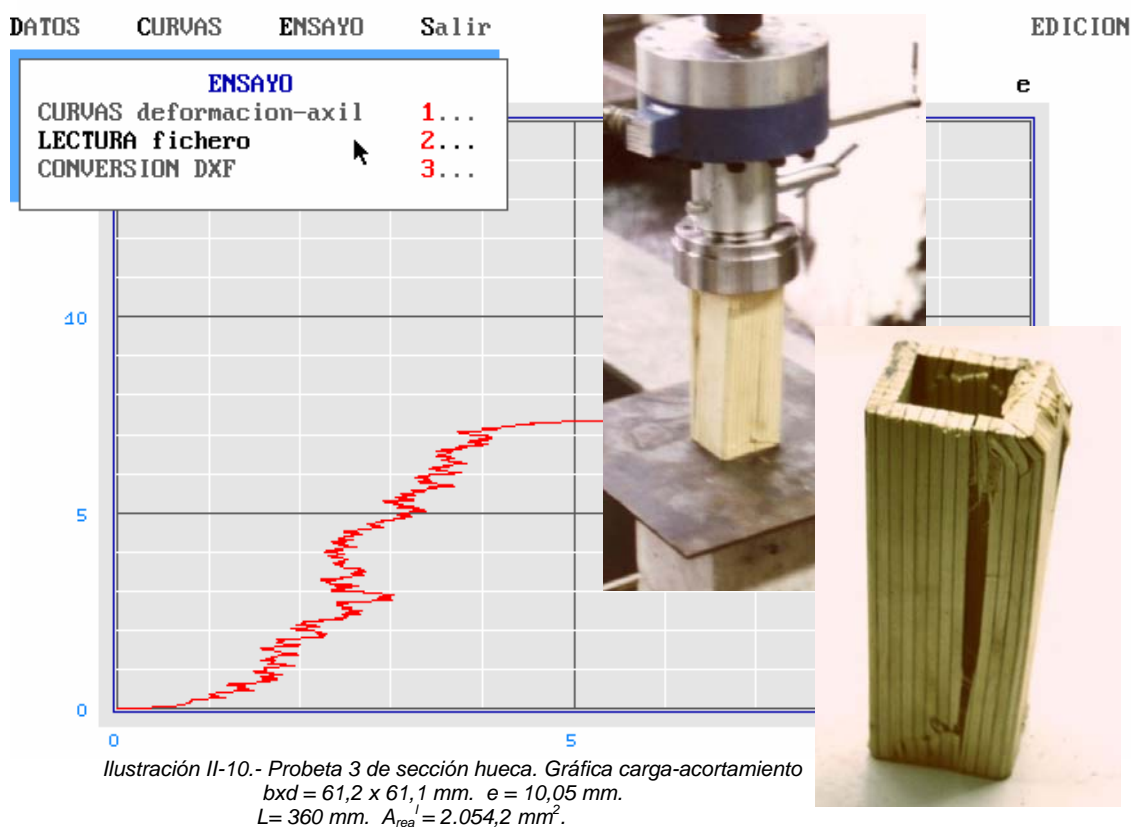
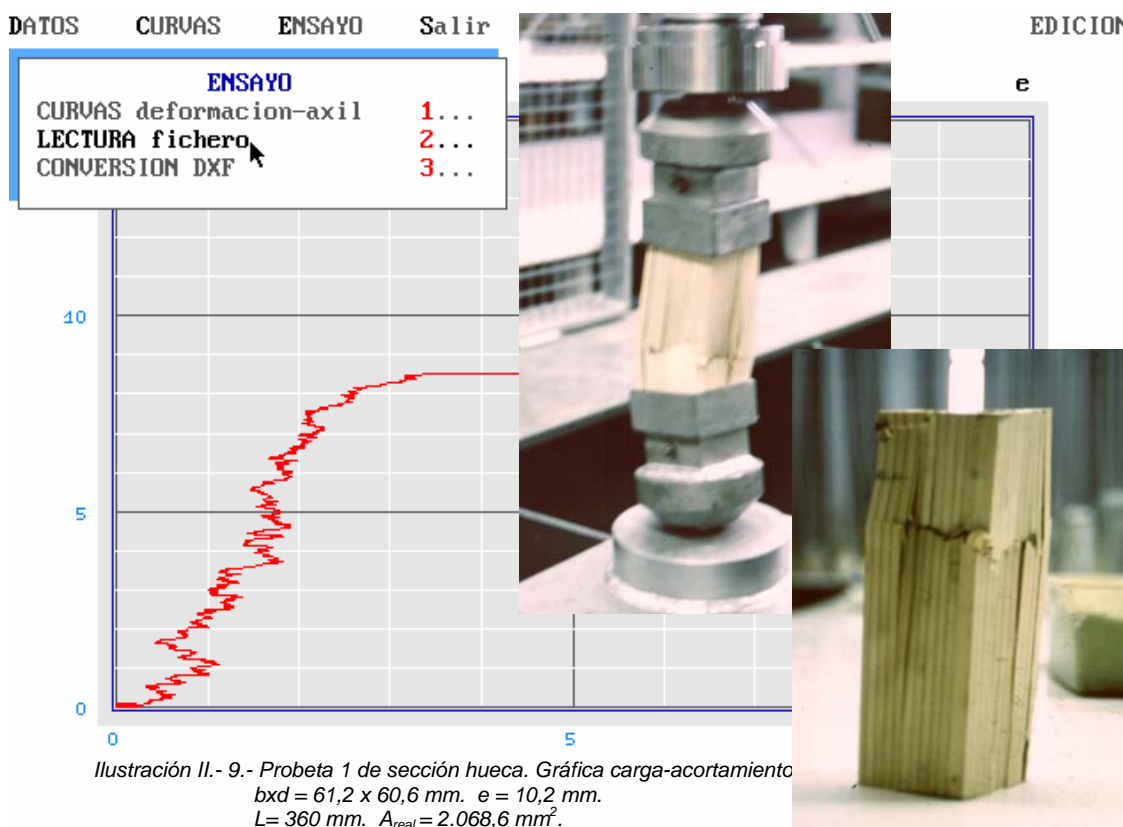


Ilustración II-8.- Probeta 6. Gráfica carga-acortamiento.



La segunda campaña de ensayos se realizó sobre probetas huecas de 360 mm. de longitud ejecutadas con láminas de la misma madera que se utilizó en las probetas de sección maciza. Se acompañan las gráficas curva-acortamiento correspondientes a las probetas 1 y 3, realizadas con esquinas ingleteadas.



A pesar de la baja calidad de las piezas confeccionadas, la tensión de rotura alcanzada superó claramente a sus equivalente macizas, con valores de $41,1 \text{ N/mm}^2$. y $35,8 \text{ N/mm}^2$. en las probetas 1 y 3, respectivamente. Dichos valores son perfectamente razonables como consecuencia de la menor repercusión que tienen las imperfecciones inherentes al material, y concuerdan con los resultados existentes de ensayos comparativos entre la madera laminada y la maciza empleada en su laminado.

Finalmente se procedió al ensayo de las probetas huecas de 1.400 mm. de luz al objeto de ver el comportamiento frente al pandeo. Se utilizaron dos sistemas de laminado para resolver las esquinas de las probetas como se aprecia en la ilustración



Ilustración II-11.- Dos opciones para el laminado de las esquinas.

Las características de las probetas ensayadas son las siguientes:

Nº probeta	Esquinas	L	b x d	e	A	L máxima	H
1	Ingleteada	1400	61,2 x 60,6	10,20	2.068,60	66,6	13,80%
2	Ingleteada	1400	61,8 x 61,8	10,10	2.088,70	65,1	13,90%
3	Ingleteada	1400	61,2 x 61,1	10,05	2.054,20	65,9	13,90%
4	Alternada	1400	60,6 x 60,2	9,35	1.909,30	66,3	14,70%
5	Alternada	1400	60,8 x 59,4	9,70	1.955,50	67,5	14,40%
6	Alternada	1400	60,9 x 60,9	9,32	1.922,90	65,4	14,80%

L	Luz de la probeta en mm.
b x d	Dimensiones de la sección en mm.
e	Espesor medio de la pared en mm.
A	Área de la sección en mm ² .
L máxima	Esbeltez mecánica máxima de la probeta
H	Humedad media de la probeta

Se acompañan los resultados correspondientes a las probetas 1 y 4 por cuanto se consideran representativas de los dos tipos de solución de esquinas: la probeta 1 ingleteando las caras de la probeta y la 4 alternándolas.

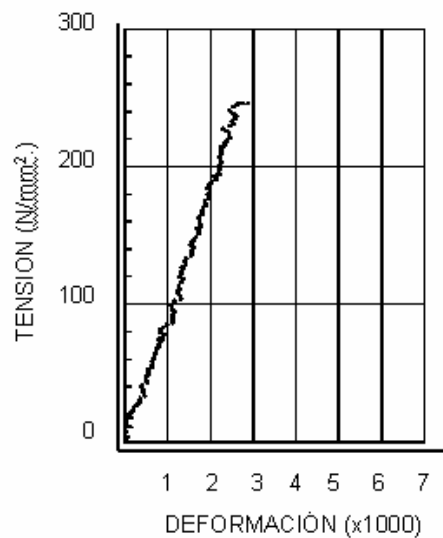


Ilustración II-12.- Probeta 1 de sección hueca.
Gráfico tensión-deformación

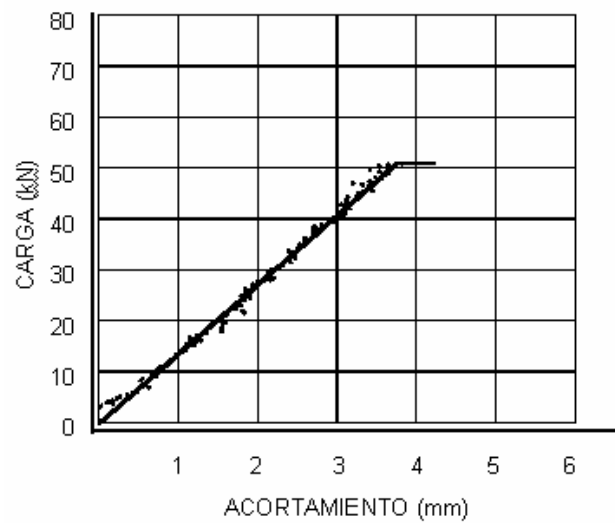


Ilustración II-13.- Probeta 1 de sección hueca.
Gráfico carga-acortamiento

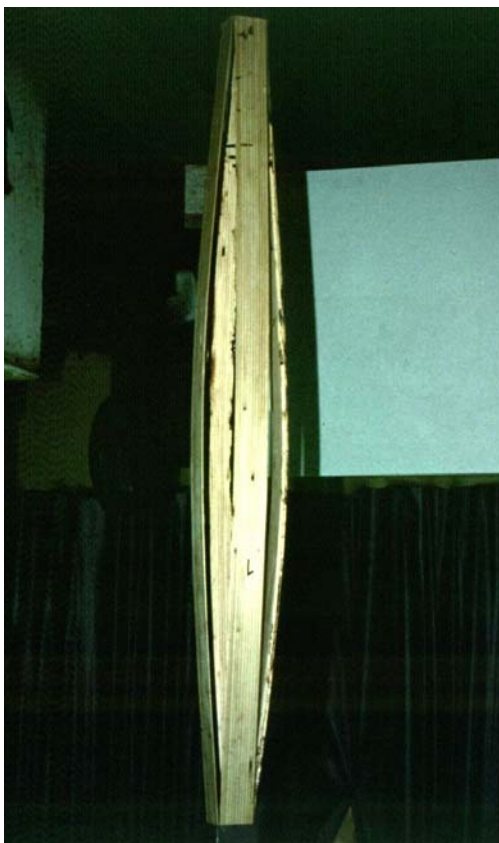


Ilustración II-17.- Probeta 4. Ensayo de compresión



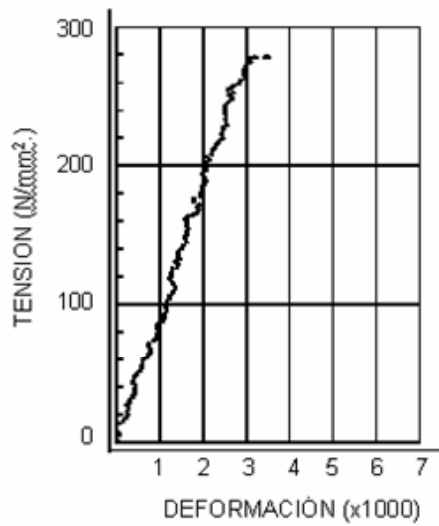


Ilustración II-15.- Probeta 4 de sección hueca.
Gráfico tensión-deformación

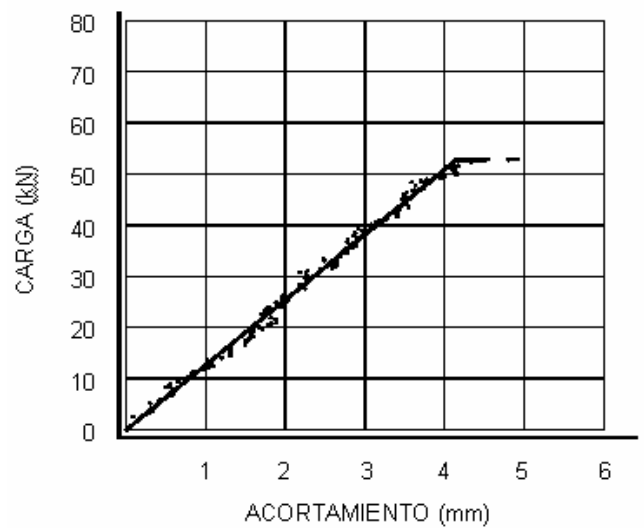


Ilustración II-16.- Probeta 4 de sección hueca.
Gráfico carga-acortamiento

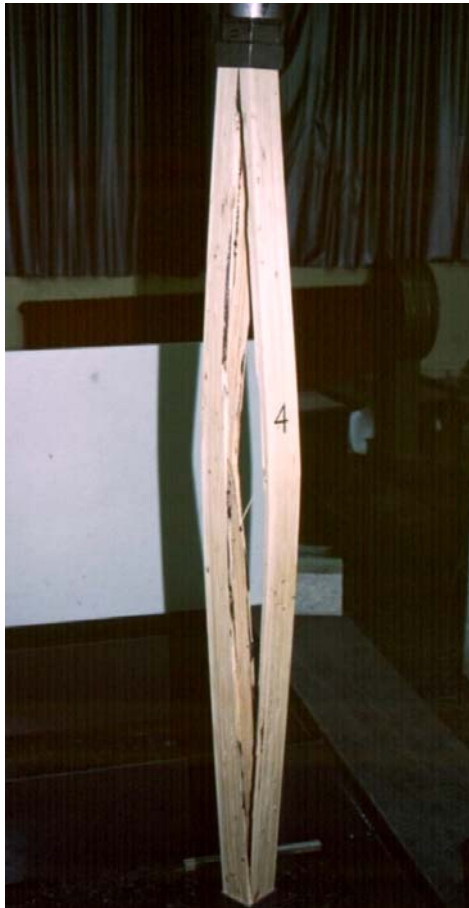


Ilustración II-17.- Probeta 4. Ensayo de compresión



INCIDENCIA DEL FACTOR DE PANDEO

Probeta 1	Probeta 4
$\lambda = 66,6$	$\lambda = 66,3$
$\sigma_{crit} = 20,18 \text{ N/mm}^2$.	$\sigma_{crit} = 21,08 \text{ N/mm}^2$.
$K_c = 0,724$	$K_c = 0,734$
$E = 9,20 \text{ kN/mm}^2$.	$E = 9,39 \text{ kN/mm}^2$.
$\sigma_{real \text{ de rotura}} = 24,65 \text{ N/mm}^2$.	$\sigma_{real \text{ de rotura}} = 27,60 \text{ N/mm}^2$.
$\sigma_{real \text{ de rotura}} / K_c = 34,05 \text{ N/mm}^2$.	$\sigma_{real \text{ de rotura}} / K_c = 37,60 \text{ N/mm}^2$.

En el ensayo realizado sobre la probeta con esquinas ingleteadas se ha obtenido una tensión real de rotura un 10,7% inferior a la obtenida con la probeta de caras alternadas. Dicha diferencia puede tener su origen en muy diversas causas: en la dispersión propia de las características mecánicas del material de ambas probetas; en las posibles diferencias de ejecución entre ambos ensayos; en deficiencias de encolado de las esquinas, tal y como pudo comprobarse tras la rotura de la probeta; en la repercusión que realmente pueda tener una u otra solución de esquina. Probablemente la causa final sea una combinación de las anteriores. Por otra parte, muy probablemente el patrón de rotura de la probeta ingleteada, con el espectacular pandeo simultáneo de las 4 caras, sería diferente del que se produciría en la realidad, pues la existencia de una guía de madera central contra la que se encolan las paredes de la barra establece una clara restricción frente a este tipo de rotura, aspecto éste no contemplado en la ejecución de las probetas.

Ahora bien, estos ensayos no tenían por finalidad establecer cuantitativamente la incidencia de una u otra forma de ejecución de esquinas, sino comprobar la viabilidad de la propuesta de barras huecas para su utilización en mallas. Dado que los resultados son del mismo orden de magnitud, y que la facilidad de ejecución y garantía de calidad del encolado es notablemente superior en el caso de caras alternadas, los resultados anteriores sirven para decantarse claramente por dicha solución.

Hay otro aspecto que también es importante reseñar: a pesar de que debido al número de ensayos realizados, no pueden sacarse conclusiones fiables y definitivas, sí en cambio se puede afirmar que los resultados obtenidos son coherentes con los esperados. En este sentido, la tabla anterior muestra los coeficientes reductores al pandeo obtenidos con el Eurocódigo 5 que, aplicados a las tensiones reales de rotura de las probetas, conducen a valores de tensión del mismo orden que los correspondientes a los probetas ensayadas de 360 mm. de longitud.

Los ensayos experimentales realizados no constituyen una campaña completa y rigurosa en orden a establecer valores resistentes o a validar métodos de cálculo. Pero tampoco era ese su objetivo; los ensayos desarrollados en el seno del Departamento de Tecnología de la Construcción se realizaron como un paso previo para seguir trabajando sobre los restantes aspectos vinculados a las mallas de madera (tipologías, generación de la geometría, diseño de nudos, etc.) hasta alcanzar una solución global al problema.

Los ensayos en lo que afecta a la presente tesis determinaron la viabilidad del empleo de barras huecas de madera laminada y el atractivo de investigar su utilización en la construcción de mallas espaciales. A partir de este punto arranca para el redactor de la presente tesis una vez obtenido el título de arquitecto e incorporado al Departamento de Tecnología de la Construcción ya como profesor asociado con dedicación a tiempo completo, la investigación que plasma en la presente tesis doctoral.

3.- COMPORTAMIENTO DE LAS BARRAS HUECAS FRENTE AL FUEGO

La inclusión de este apartado dentro del capítulo dedicado a las barras huecas no tiene por finalidad mostrar los estudios o avances que se hayan realizado en este campo, puesto que dicha línea de investigación no ha sido todavía abordada, entre otras razones, por la inexistencia de medios que permitiesen un contraste experimental de resultados.

Su inclusión obedece por tanto a otro objetivo, el de mostrar que las especificidades de este tipo de sección no suponen, respecto al comportamiento ante el fuego, un inconveniente que desaconseje su posible utilización práctica en la construcción de mallas espaciales.

Cuando se plantea el comportamiento ante el fuego de cualquier material se tiene que distinguir claramente entre reacción al fuego y resistencia al fuego, o estabilidad al fuego en el caso de elementos estructurales.

Respecto al primero de los conceptos, la reacción al fuego determina el comportamiento como material y se cuantifica mediante un índice que mide la capacidad del material para favorecer el desarrollo del incendio. De acuerdo con la norma UNE 23.727/81 la madera en espesores superiores a 18 mm. tiene una clasificación M3 en reacción al fuego, lo que la caracteriza como combustible y medianamente inflamable. Se trata de una mala clasificación, pues favorece la primera fase de desarrollo inicial de un incendio. No obstante, con tratamientos de ignifugación se puede llegar alcanzar la clasificación M1, correspondiente a combustible pero no inflamable, es decir, que su combustión cesa cuando desaparece la aportación de calor desde un foco exterior.

Los tratamientos de ignifugación de la madera pueden ser de dos tipos: en profundidad, también denominado en masa, o superficial. La ignifugación en masa puede realizarse en autoclave, y por inmersión, presentando esta el inconveniente de unas menores profundidades de penetración del producto (del orden de 20 mm.). En el caso de las barras huecas dado que el espesor de pared se mueve en un entorno de 30-40 mm., el tratamiento por inmersión puede ser plenamente eficiente, resultando ignifugada la totalidad del material de la barra.

Respecto a los tratamientos superficiales existen barnices intumescentes de dos componentes, específicamente desarrollados para la madera, que se aplican con pistola a presión. Dichos barnices ante la acción del fuego, forman una capa aislante que retrasa la combustión del material; también existen otro tipo de tratamientos superficiales consistentes en la aplicación mediante pulverizado o inmersión de sales ignífugas disueltas en agua, métodos que serán objeto de estudio en futuros trabajos de investigación.

Tal y como se ha indicado, cualquiera de los procedimientos de ignifugación señalados proporcionan una clasificación M1, lo que permite el uso de estos elementos en estructuras de cubierta para todo tipo de uso.

El segundo de los conceptos, relativo a la estabilidad al fuego, evalúa el comportamiento del elemento estructural cuantificando el tiempo durante el cual es capaz de seguir cumpliendo su función resistente, determinándose de acuerdo con las normas UNE 23093/81 y 23820/91. Desde este punto de vista, los elementos estructurales de madera tienen un aceptable comportamiento, puesto que el propio proceso de combustión genera una capa carbonizada que avanza con una velocidad aproximada de 0,7 mm./min. y que constituye un excelente aislante térmico, con lo que el interior de la pieza no experimenta grandes incrementos de temperatura. En consecuencia, la combustión genera una reducción progresiva de sección, pero la madera no carbonizada mantiene sensiblemente constantes sus características mecánicas. Por todo ello, una forma eficiente de dotar de estabilidad a un elemento estructural consiste en el sobredimensionado de la sección con un espesor adicional cuyo valor dependerá del período de tiempo exigible. Para la determinación del espesor de protección se han desarrollado diversos métodos de cálculo:

Método de la sección eficaz. Se trata de un procedimiento simplificado que evalúa la capacidad resistente de la pieza con una sección eficaz reducida suponiendo que sus propiedades mecánicas no quedan afectadas por el incremento de temperatura.

Método de la resistencia y rigidez reducida, que sigue iguales planteamientos al anterior, pero teniendo en cuenta las variaciones de rigidez y resistencia del material.

Método general que tiene en cuenta el efecto de la temperatura y humedad en cualquier punto de la sección reducida, así como las relaciones entre resistencia y rigidez en las caras expuestas y protegidas.

Cualquiera de los métodos citados, recogidos en la norma UNE ENV 1995-1-2, permite evaluar que espesor adicional de madera se necesita para conseguir una determinada estabilidad ante el fuego. Ahora bien, este criterio de protección contra el fuego a través del sobredimensionado de la sección no es de razonable aplicación en el caso de piezas huecas. A título de ejemplo, de acuerdo con la citada norma, los espesores eficaces adicionales a añadir en todo el perímetro de la pieza para conseguir una EF-15 o una EF-30 serían los siguientes:

$$d_{ef} = \beta_0 \cdot t + k_0 \cdot d_0$$

d_{ef}	profundidad de la carbonización eficaz
β_0	velocidad de carbonización eficaz en mm./min., corregido para tener en cuenta el efecto del redondeo de las esquinas de la sección En madera laminada de coníferas, densidad > 290 Kg/m ³ , 0,7 mm./min.
t	Tiempo de exposición al fuego en minutos
k_0	Coefficiente de valor : Si $t < 20$ min. $k_0 = t/20$ Si $t \geq 20$ min. $k_0 = 1$
d_0	Valor de la profundidad adicional que se establece en 7 mm.

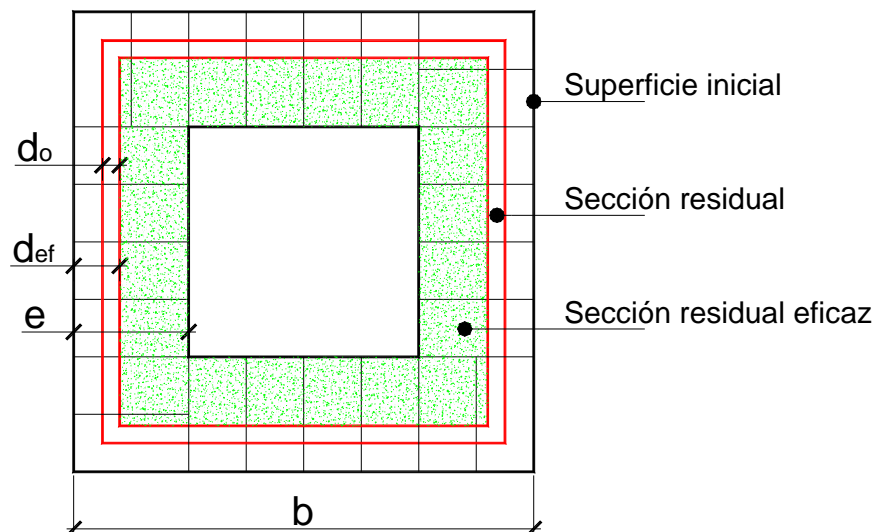
EF-15 $d_{ef} = 15,75$ mm.

EF-30 $d_{ef} = 28,00$ mm.

Los espesores necesarios son de magnitud comparable al espesor de la pared de la pieza. No obstante, para entender en su justa media la incidencia que tiene la pérdida de sección en la capacidad de carga, hay que tener en cuenta dos factores:

- A. Por una parte, la resistencia de cálculo para la situación accidental de incendio es un 48% superior a la correspondiente para las restantes combinaciones de acciones.
- B. En segundo lugar, los coeficientes parciales de seguridad que ponderan las acciones se reducen también de forma muy significativa. En cargas permanentes el coeficiente es de valor unidad, en lugar de 1,35; en la sobrecarga de uso, el coeficiente pasa a ser 0,50 en viviendas y oficinas y 0,70 en locales públicos y comerciales frente al valor de 1,50; en lo que respecta a la acción del viento el coeficiente se reduce de 1,50 a 0,50.

En consecuencia, en términos reales de pérdida de capacidad de carga debido a la profundidad de la carbonización, la incidencia es claramente inferior a lo que pudiera sugerir su magnitud en relación al espesor de la pieza empleada. Lógicamente, aún cuando dicha incidencia tiene que ser evaluada para cada dimensionado concreto, se plantea el estudio en dos casos representativos:



b	Lado de la sección hueca
e	Espesor de la sección hueca
L	Luz de la pieza
A	Área
I	Inercia
i	Radio de giro
λ	Esbeltez mecánica
σ_{crit}	Tensión crítica de Euler
K_c	Coficiente reductor por pandeo
K_{mod}	Factor de modificación de los valores resistentes en función de la duración de la carga y el contenido de humedad
N	Valor de servicio del esfuerzo axial de compresión
N^*	Valor de cálculo del esfuerzo axial de compresión

CASO 1

Estructura de cubierta

Madera laminada clase resistente GL24h

Resistencia característica a compresión paralela a las fibras. $f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$.

Clase de servicio 1

Combinación de acciones: Carga permanente = 60% de la carga total
Sobrecarga de nieve = 40% de la carga total

Dimensiones de la sección: $b = 12 \text{ cm}$.
 $e = 3 \text{ cm}$.

Longitud de las barras $L = 300 \text{ cm}$.

DIMENSIONADO SIN FUEGO

Características de la sección	Términos de pandeo	Dimensionado
$A = 108 \text{ cm}^2$.	$\lambda = 77,46$	$K_{mod} = 0,90$
$I = 1.620 \text{ cm}^4$.	$\sigma_{crit} = 15,46 \text{ N/mm}^2$.	$N^* = 103.792 \text{ N}$
$i = 3,87 \text{ cm}$.	$K_c = 0,5784$	$N = 73.610 \text{ N}$

DIMENSIONADO CON FUEGO. EF-15 $d_{ef}=15.75\text{mm}$.

Características de la sección	Términos de pandeo	Dimensionado
$A = 42,32 \text{ cm}^2$.	$\lambda = 97,19$	$K_{mod} = 0,90$
$I = 403,20 \text{ cm}^4$.	$\sigma_{crit} = 9,72 \text{ N/mm}^2$.	$N^* = 44.205 \text{ N}$
$i = 3,09 \text{ cm}$.	$K_c = 0,3823$	$N = 65.008 \text{ N}$

En este primer caso, transcurridos 15 minutos, el valor de la carga de servicio en la situación de incendio es un 11,68% inferior a la de diseño. Si el problema se planteara en sentido inverso, determinando con que valor de sección eficaz se obtendría igual valor de carga de servicio en la situación con incendio o sin él, se alcanza una profundidad de carbonización de 14,75 mm., lo que equivale a un tiempo de estabilidad al fuego de 14 minutos, sin tener que realizar ningún tipo de sobredimensionado de la sección.

Si analizamos un segundo caso con un mayor espesor de la sección hueca, el tiempo de estabilidad al fuego lógicamente aumenta.

CASO 2

Estructura de cubierta

Madera laminada clase resistente GL24h

Resistencia característica a compresión paralela a las fibras. $f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$.

Clase de servicio 1

Combinación de acciones: Carga permanente = 60% de la carga total
Sobrecarga de nieve = 40% de la carga total

Dimensiones de la sección: $b = 16 \text{ cm}$.
 $e = 4 \text{ cm}$.

Longitud de las barras $L = 300 \text{ cm}$.

DIMENSIONADO SIN FUEGO.

Características de la sección	Términos de pandeo	Dimensionado
$A = 192 \text{ cm}^2$.	$\lambda = 58,09$	$K_{\text{mod}} = 0,90$
$I = 5.120 \text{ cm}^4$.	$\sigma_{\text{crit}} = 27,49 \text{ N/mm}^2$.	$N^* = 272.694 \text{ N}$
$i = 5,16 \text{ cm}$.	$K_c = 0,8548$	$N = 193.400 \text{ N}$

DIMENSIONADO CON FUEGO. EF-15 $d_{\text{ef}}=15.75\text{mm}$.

Características de la sección	Términos de pandeo	Dimensionado
$A = 101,12 \text{ cm}^2$.	$\lambda = 68,66$	$K_{\text{mod}} = 0,99$
$I = 1930,79 \text{ cm}^4$.	$\sigma_{\text{crit}} = 19,48 \text{ N/mm}^2$.	$N^* = 196.234 \text{ N}$
$i = 4,37 \text{ cm}$.	$K_c = 0,7031$	$N = 288.579 \text{ N}$

En este segundo caso, el valor de la carga de servicio en la situación de incendio, transcurridos 15 minutos desde su comienzo, supera en un 47,66% el correspondiente al dimensionado en la hipótesis sin incendio.

Planteando de nuevo el problema a la inversa, la pieza presenta una estabilidad al fuego de 20 minutos, valor para el cual la carga en servicio se iguala para el dimensionado con fuego o sin él.

Para completar la visión del comportamiento al fuego de las secciones huecas, hay que tener presente que los tratamientos de ignifugación son ineludibles para alcanzar una reacción al fuego M1. Ahora bien, dichos procedimientos, con espesores en torno a 200 micras, aportan de forma implícita una estabilidad adicional de unos 20-30 minutos; ello significa que las barras huecas, sin ningún tipo de sobredimensionado, pueden alcanzar fácilmente una estabilidad en torno a 30-45 minutos, valores que pueden ser incrementados sin problema, bien sobredimensionando la sección o, preferiblemente, aumentando el espesor del revestimiento intumescente.

Ahora bien, teniendo en cuenta que el art. 14 “Estabilidad ante el fuego exigible a la estructura” de la Norma Básica NBE-CPI/96 establece que en las estructuras ligeras de cubierta, entendiendo por tales aquellas cuya carga permanente no exceda de 100 Kg/m^2 , el valor exigible es EF-30, se puede concluir que el comportamiento frente al fuego de estas estructuras en modo alguno constituye una limitación a su posible utilización y, desde luego, pueden competir en situación ventajosa con las ejecutadas con perfiles tubulares de acero.

El estudio de la estabilidad al fuego de la estructura no depende tanto de la madera como de los medios de unión y la resistencia al fuego de los herrajes, lo que implica la necesidad de protección de los mismos. No obstante, este último aspecto no es ya específico de este tipo de estructuras, y se plantea tanto en las piezas de madera con sección maciza, como en las mallas espaciales construidas con perfilera de acero.

II.- BARRAS HUECAS DE MADERA.

4.- DISEÑO DE ENLACE EXTREMO DE BARRA.

Una vez determinado el buen comportamiento de las barras de madera laminada de sección hueca, se trata ahora de garantizar una eficaz transmisión de esfuerzos, especialmente en el caso de los esfuerzos de tracción, es por ello que el correcto diseño del enlace extremo de barra es clave para la viabilidad de la estructura espacial.

En el apartado de antecedentes dedicado a las mallas de madera se han mostrado diferentes mecanismos de transmisión de esfuerzos axiales al nudo de enlace de barras; en todos los casos se introduce en la barra de madera un elemento metálico que garantice la adecuada transmisión de esfuerzos.

De cara al diseño de nudo de enlace de barras huecas, se establecen una serie de condicionantes de partida:

- ❑ El enlace extremo de barra ha de permitir una eficaz transmisión de esfuerzos tanto de compresión como de tracción.
- ❑ El enlace ha de tener una ejecución sencilla y fácilmente integrable en un proceso industrial abaratando así el costo final de la estructura.

Se realizan a lo largo del tiempo una serie de propuestas que se presentan a continuación:

1ª PROPUESTA

Incorporado a la primera propuesta de nudo de enlace de barras, se diseña un elemento metálico de conexión compuesto por una tuerca octogonal a la que van soldados cuatro redondos macizos que siguen las aristas de un octaedro. El encuentro con la madera se resuelve mediante conectores metálicos troquelados fijados al interior de la sección hueca. Se opta por el empleo de conectores metálicos del tipo placa-clavo dado que el empleo de otras soluciones, tales como pasadores, pernos o soluciones análogas implicarían el uso de un elevado número de elementos puesto que los esfuerzos a transmitir pueden alcanzar valores apreciables.

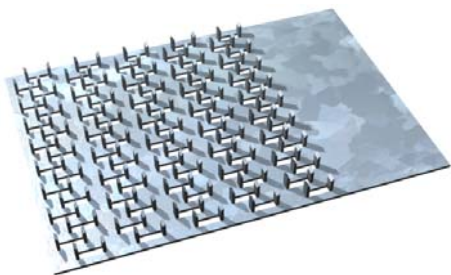


Ilustración II-18.- Chapa troquelada de conexión.



Ilustración II-19.- Modelo de enlace extremo de barra

Con esta solución, la fijación queda oculta al exterior y su ejecución es sencilla y coherente con el concepto de barra hueca.

El procedimiento operativo para su montaje consiste en el encolado de las caras laterales de la pieza utilizando el nudo como guía o maestra con lo que, una vez finalizado el proceso de encolado y prensado, la barra se encuentra totalmente terminada para su montaje en obra.



Ilustración II-20.- Modelo a escala 1:1

El nudo de enlace de barras se compone de una esfera hueca con un casquete superior roscado que permite el acceso a su interior; dicha esfera incorpora una serie de orificios para el paso de los vástagos, que son recibidos con tuercas bloqueables desde el interior de la esfera.

Este diseño de nudo permite con una única solución dar respuesta a cualquier configuración de barras en el espacio, siendo posible la realización de mallas de una o dos capas aplicadas tanto a formas estructurales planas como de simple o doble curvatura. Posibilita además un simple y fácil montaje y desmontaje de la estructura dentro de unas ciertas condiciones de tolerancia que previsiblemente se producirán en el proceso de ejecución.

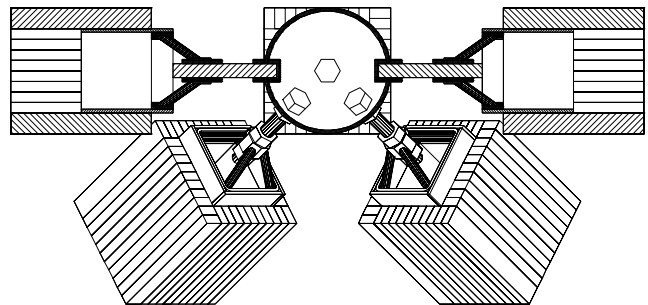


Ilustración II-21.- Sección vertical del nudo

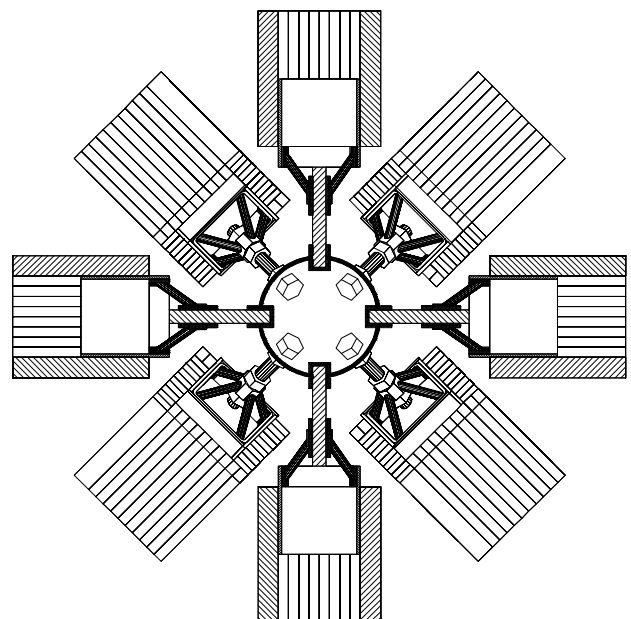


Ilustración II-22.- Planta del nudo de enlace

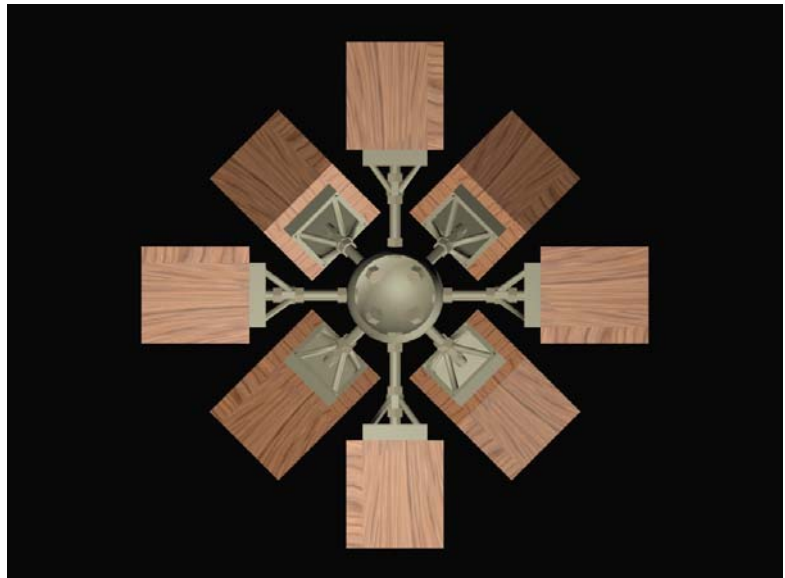


Ilustración II-23.- Planta del nudo abierto en malla semioctaédrica

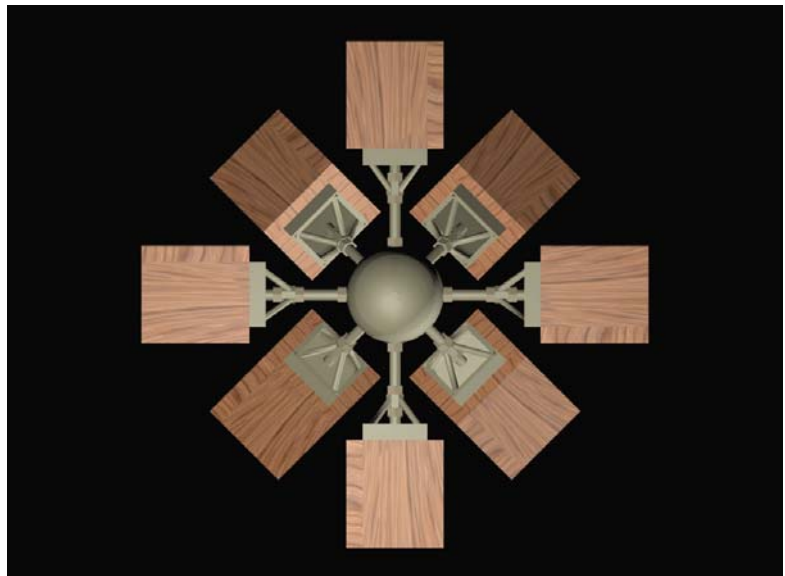


Ilustración II-24.- Planta del nudo cerrado en malla semioctaédrica

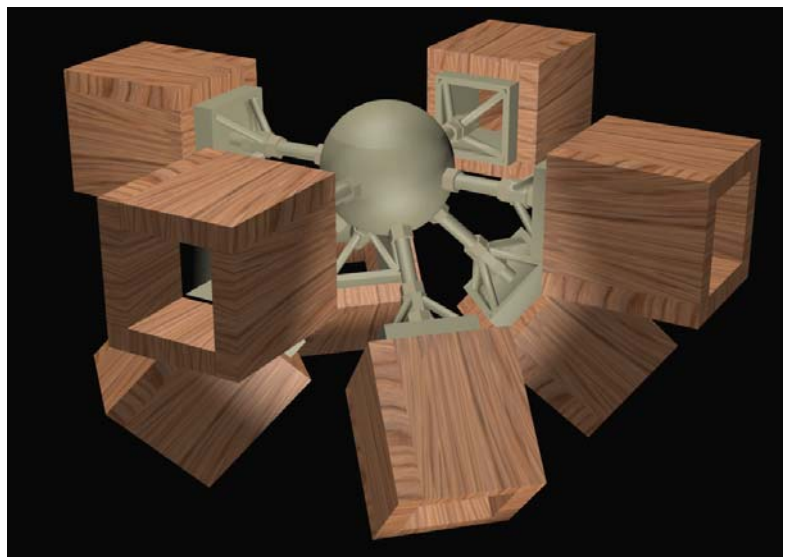


Ilustración II-25.- Perspectiva del nudo cerrado en malla semioctaédrica

2ª PROPUESTA

A pesar del interés indudable del empleo de piezas huecas de madera laminada, las primeras propuesta de mallas espaciales transmitían una imagen de mera sustitución de material, en un proceso constructivo consolidado para las estructuras de acero. La idea de dotar a las mallas de madera de un carácter propio y la intención de superar la idea de barra-nudo como elemento conformador de la estructura, derivó la investigación a un nuevo camino donde el elemento modular se convirtió en verdadero protagonista.

Paralelamente al estudio del extremo de barra se inicia entonces en el seno del Departamento de Tecnología de la Construcción una profunda línea de investigación en lo que respecta a las diferentes opciones que ofrecen la modulabilidad y la apilabilidad en el campo de las mallas espaciales de madera. Fruto de esta investigación son las ponencias presentadas en numerosos congresos internacionales, las patentes que se muestran en las paginas siguientes y por encima de todo la tesis doctoral “MALLAS PLANAS Y CILÍNDRICAS DE MÓDULOS APILABLES DE MADERA LAMINADA” redactada por el Dr. Arquitecto D. Javier Álvarez Pablos en el año 1998 que supuso un gran impulso en todo lo referente a lo modelización automática, cálculo, dimensionado y uniformización modular de estructuras espaciales de módulos apilables de madera laminada..

La concepción modular introdujo una nueva exigencia en cuanto al diseño del nudo de enlace que fue preciso resolver: los nudos de la malla debían permitir tanto el enlace entre las barras que componen un módulo como el enlace entre los distintos módulos que conforman la estructura.

El estudio se centro por tanto en las mallas con cordones en dos direcciones, optando por la utilización de un módulo mitad del cuboctaedro, obtenido a partir del poliedro Arquimediano, constituido por 8 caras triangulares, 6 caras cuadradas, 12 vértices y 24 aristas

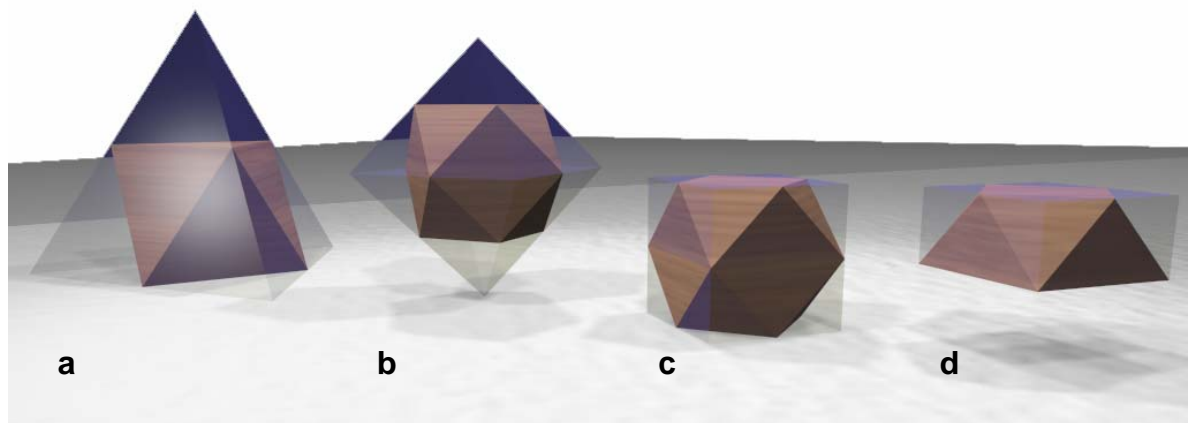


Ilustración 11-26.- a. Octaedro, b-c. Cuboctaedro, d. Semicuboctaedro

Para garantizar una eficiente transmisión de carga entre la barra y el nudo, se recurrió a la misma solución ya adoptada en la primera propuesta; se trata de un conector troquelado de chapas de reducido espesor. Esta solución además de resultar oculta consigue un reparto muy favorable de tensiones en la madera frente a otras alternativas más convencionales, tales como pernos y pasadores.

Los enlaces entre barras y entre módulos, como se aprecia en las ilustraciones, están íntimamente relacionados. Se diseñó para la capa inferior una pieza hexagonal que además de permitir el enlace de los distintos cordones y diagonales del módulo, resuelve el encuentro entre los distintos cordones de la malla. En cuanto a la capa superior, no es necesaria la presencia de un nudo de enlace, ya que las barras que confluyen en el nudo se unen a tope a través de las chapas de enlace de extremo de barra.

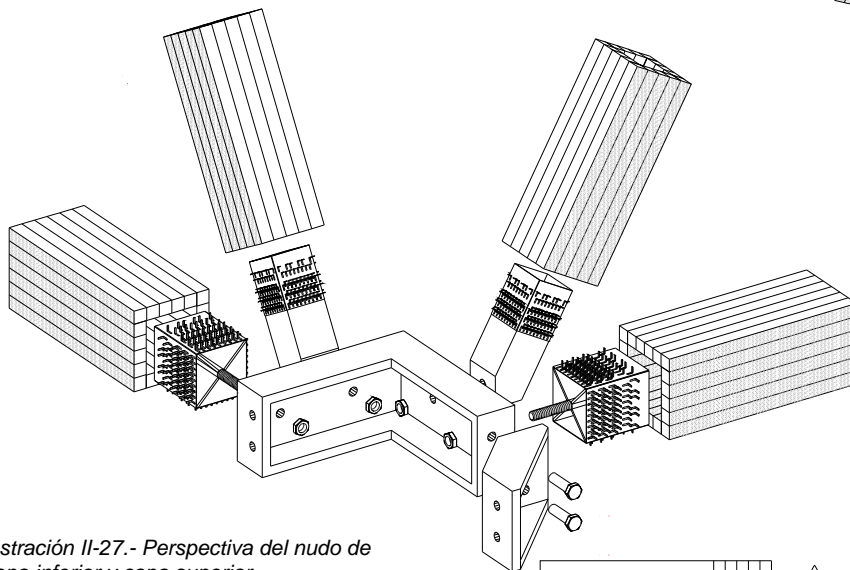
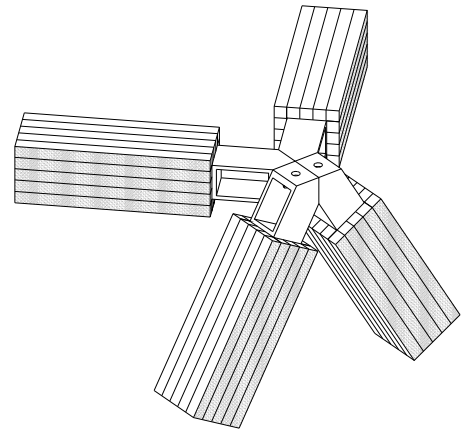


Ilustración II-27.- Perspectiva del nudo de capa inferior y capa superior

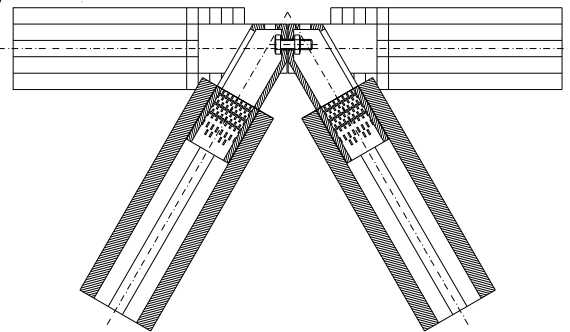


Ilustración II-28.- Planta del nudo de enlace de capa superior

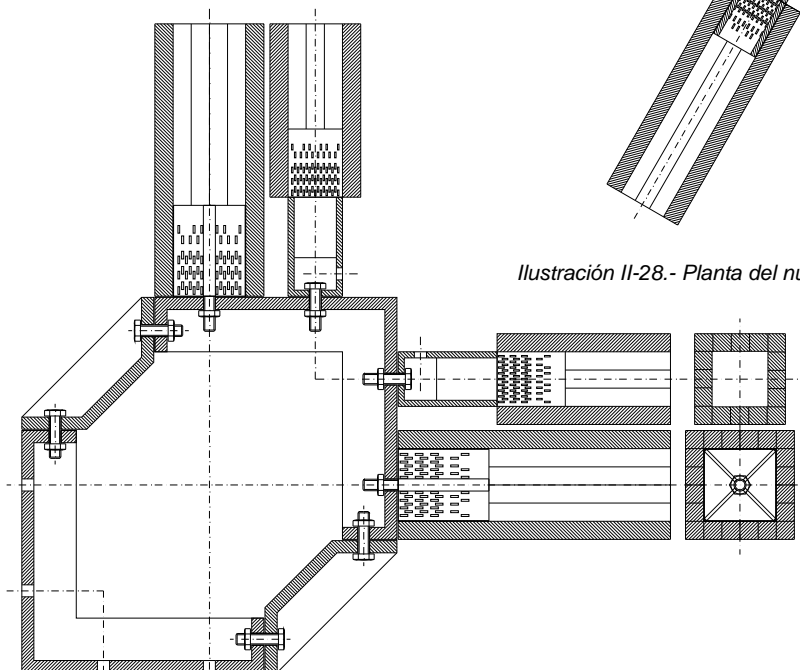
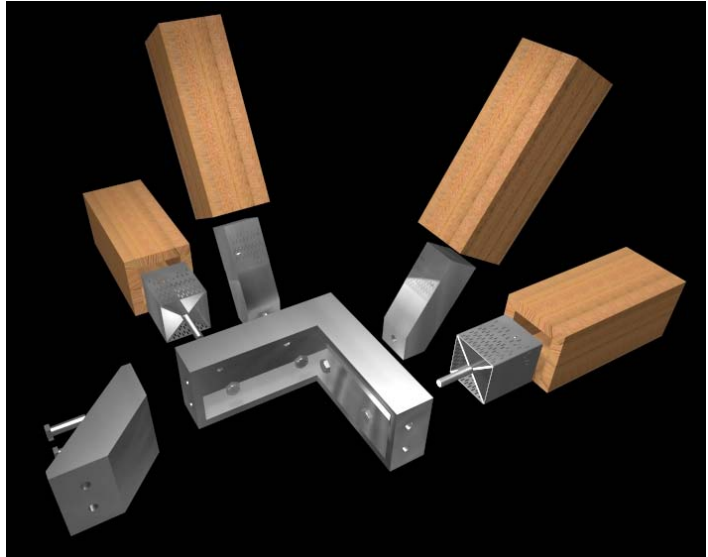
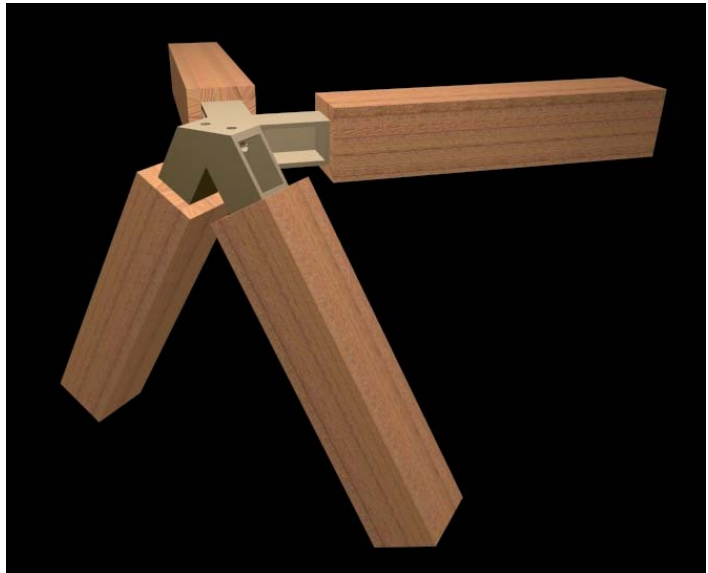


Ilustración II-29.- Planta del nudo de enlace de capa inferior



*Ilustración II-30.- Detalle del nudo
de la capa inferior*



*Ilustración II-31.- Detalle del nudo
de la capa superior*

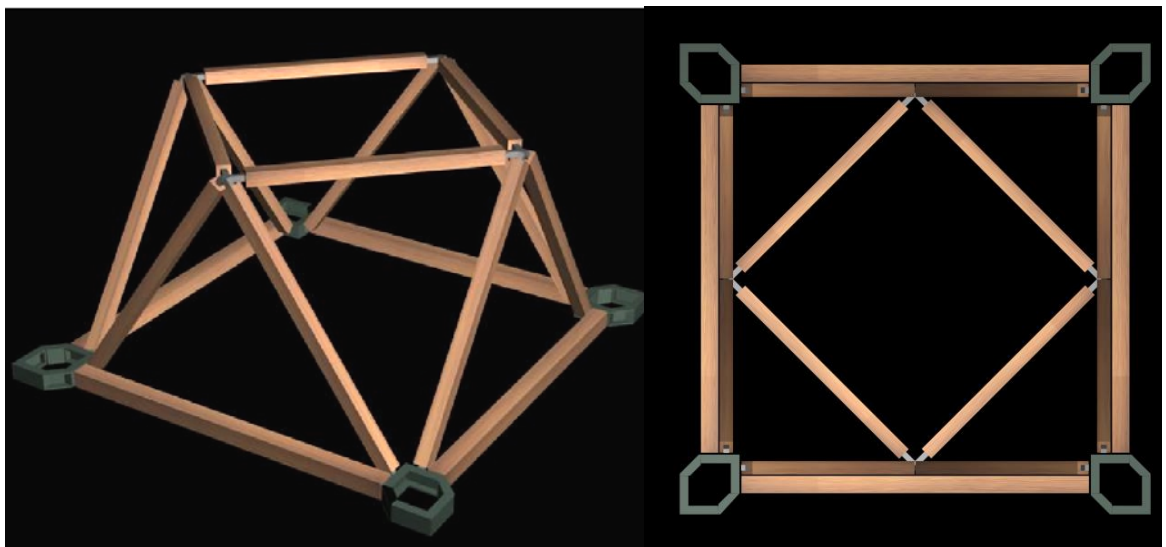
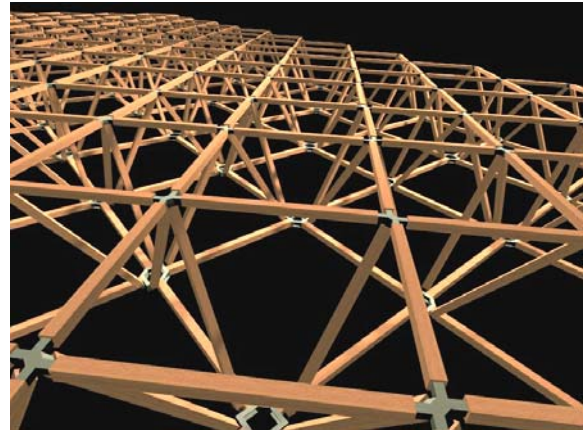
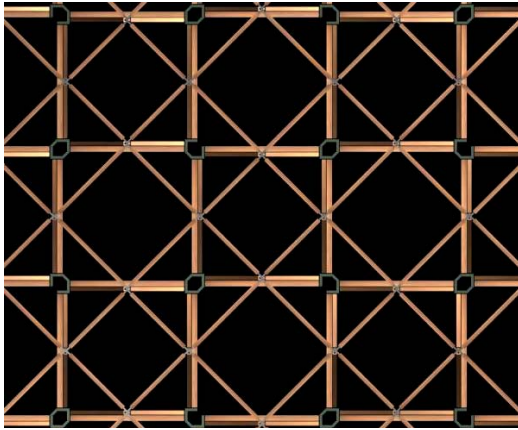


Ilustración II-32.- Perspectiva y planta del módulo semicuboctaédrico

La utilización del módulo semioctaédrico como elemento apilable generador de la malla implicaba la aceptación de la disposición excéntrica de las diagonales con respecto a los cordones. La importancia de la problemática que plantea la excentricidad en el axil, generando flexiones en una estructura básicamente pensada para soportar cargas a través de la sollicitación axil de sus barras, implicó una búsqueda de alternativas a la solución del nudo, pero todas las soluciones barajadas impedían el apilamiento de módulos, argumento básico en el desarrollo de la investigación. Se cuestiona en este punto el empleo del módulo semioctaédrico como elemento generador de la geometría.



*Ilustración II-33.- Planta y perspectiva de una malla de módulos semicuboctaédricos.
Se aprecia la disposición excéntrica de las diagonales.*

Un análisis de la malla generada a partir del módulo semioctaédrico puso de manifiesto la posibilidad de generar idéntica geometría a partir del módulo semioctaédrico rotado 45° y ensamblado por la diagonal, resolviendo el problema de la excentricidad en los nudos y permitiendo el apilamiento de los módulos.

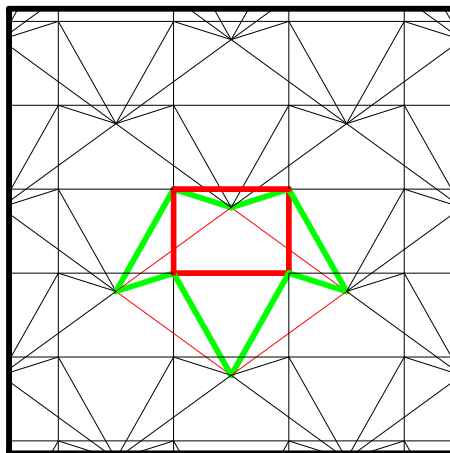


Ilustración II-34.- Malla de semicuboctaedros.

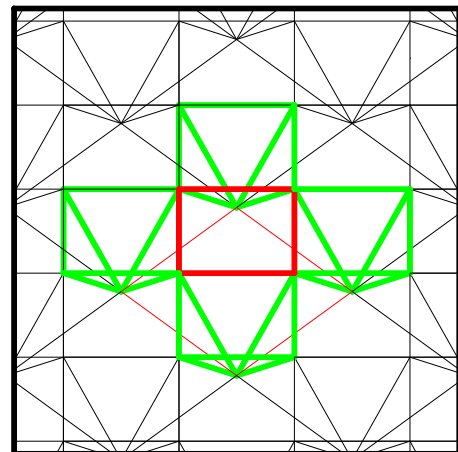


Ilustración II-35.- Malla de semioctaedros.

Dado lo novedoso de la solución el equipo investigador solicitó la concesión de dos patentes: la primera en lo que respecta al nudo de enlace de barras y la segunda en lo que atañe a la estructura espacial de barras formada por módulos apilables de diagonales excéntricas, concediéndose ambas el día 23 de Noviembre de 1999.



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



⑪ Número de publicación: **2 129 308**

⑫ Número de solicitud: 009600060

⑬ Int. Cl.⁶: E04B 1/19
F16S 3/08

⑭

PATENTE DE INVENCION

B1

⑮ Fecha de presentación: **29.12.1995**

⑯ Fecha de publicación de la solicitud: **01.06.1999**

Fecha de concesión: **23.11.1999**

⑰ Fecha de anuncio de la concesión: **16.02.2000**

⑱ Fecha de publicación del folleto de patente:
16.02.2000

⑲ Titular/es: **Universidad de La Coruña
Oficina de Transferencia de Resultados
de Investigación (O.T.R.I.)
E.T.S. Caminos, Canales y Puertos
Campus de Elviña
15192 La Coruña, ES**

⑳ Inventor/es: **Estévez Cimadevilla, Fco. Javier;
Martín Gutiérrez, Emilio;
Álvarez Pablos, Javier y
Vázquez Rodríguez, José Antonio**

㉑ Agente: **No consta**

㉒ Título: **Nudo de enlace de barras de sección hueca de madera laminada encolada para la conformación de estructuras espaciales.**

㉓ Resumen:
Nudo de enlace de barras de sección hueca de madera laminada encolada para la conformación de estructuras espaciales.
La presente invención hace referencia al dispositivo utilizado para la unión de barras de sección hueca de madera laminada encolada, aportándose la solución tecnológica completa que permite resolver el enlace de las barras y la conformación de estructuras espaciales. Las barras de sección hueca llevan alojadas en sus extremos una pieza prismática que permite, por una parte, servir de plantilla para la construcción de las piezas huecas de madera y, por otra parte, enlazar unas barras con otras y con los nudos.

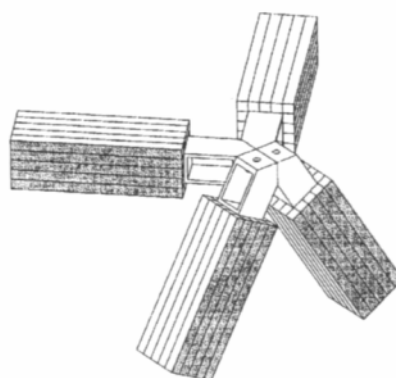


FIGURA 1

ES 2 129 308 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el artº 37.3.8 LP.

Venta de fascículos: Oficina Española de Patentes y Marcas. C/Panamá, 1 - 28036 Madrid



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



⑪ Número de publicación: **2 129 309**

⑫ Número de solicitud: 009600061

⑬ Int. Cl.⁶: E04B 1/19

F16S 3/08

⑭

PATENTE DE INVENCION

B1

⑮ Fecha de presentación: **29.12.1995**

⑯ Fecha de publicación de la solicitud: **01.06.1999**

Fecha de concesión: **23.11.1999**

⑰ Fecha de anuncio de la concesión: **01.02.2000**

⑱ Fecha de publicación del folleto de patente:
01.02.2000

⑲ Titular/es: **Universidad de La Coruña
Oficina de Transferencia de Resultados
de Investigación (O.T.R.I.)
E.T.S. Caminos Canales y Puertos
Campus de Elviña
15192 La Coruña, ES**

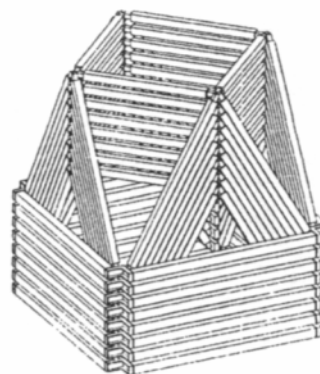
⑳ Inventor/es: **Estévez Cimadevilla, Fco. Javier;
Martín Gutiérrez, Emilio;
Álvarez Pablos, Javier y
Vázquez Rodríguez, José Antonio**

㉑ Agente: **No consta**

㉒ Título: **Estructura espacial de barras formada por módulos apilables de diagonales excéntricas.**

㉓ Resumen:

Estructura espacial de barras formada por módulos apilables de diagonales excéntricas. La presente invención hace referencia a la construcción de estructuras espaciales a base de elementos modulares apilables formados por barras en los cuales las diagonales se disponen excéntricas respecto a los cordones. La construcción modular de la estructura permite su ejecución en taller, su almacenamiento en poco espacio y, asimismo, facilita su transporte a la obra. La disposición de las diagonales excéntricas respecto a los cordones es lo que hace apilables módulos con diagonales contenidas en planos verticales, aspecto éste interesante para facilitar la resolución de las uniones.



ES 2 129 309 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el artº 37.3.8 LP.

Venta de fascículos: Oficina Española de Patentes y Marcas. C/Panamá, 1 - 28036 Madrid

3ª PROPUESTA

En la primera y segunda propuesta se dio por resuelto el problema de la transmisión de cargas del nudo a la barra por medio de conectores metálicos del tipo placa-clavo. Esto fue así por dos razones fundamentales: de una parte este tipo de unión satisfacía la premisa de que el enlace fuese oculto, y por otra parte el empleo del sistema placa-clavo permitía una amplia superficie de conexión entre la pieza metálica y la madera repartiendo la carga de manera muy uniforme lo que, dada la baja resistencia a cortante de la madera, hacía pensar que dicho enlace constituiría una solución óptima al problema. Sin embargo, la toma en consideración de una serie de nuevos factores trajo acarreada la valoración de alternativas al diseño inicial:

- ❑ Por un lado, el empleo de placas-clavo conformando una pieza cajón dejando el interior de la barra hueca abierto al exterior, representa un inconveniente muy importante desde el punto de vista de la resistencia al fuego de las barras, al aumentar notablemente la superficie expuesta y consecuentemente, dado el reducido espesor de las paredes, se reduce drásticamente el tiempo en el que se mantiene una estabilidad y capacidad portante admisible. Al mismo tiempo, las placas-clavo, de un espesor reducido, al no estar embebidas en madera, exigirían una protección adicional contra el fuego de difícil ejecución.
- ❑ Por otra parte la ejecución de las chapas troqueladas en forma de cajón, precisas para la construcción del enlace extremo de barra puede representar un coste adicional importante que reste competitividad a la solución. Para asegurar la viabilidad del diseño definitivo, su fabricación no debe suponer la necesidad de desarrollo de un proceso industrial específico. Este problema se plantea incluso para la construcción del primer modelo a escala real.

La toma en consideración de lo expuesto en los puntos anteriores determinó el inicio de la búsqueda de otro tipo de enlace cuya ejecución fuese factible dentro de la dinámica y la forma de trabajo habitual de las empresas fabricantes de madera laminada.

En principio se barajaron diversas posibilidades con elementos de fijación del tipo clavija (pernos, pasadores, etc.). Este tipo de uniones, habituales en los escasos ejemplos de mallas de madera que han sido construidas, fueron desechadas pues presentan dos inconvenientes inevitables: la unión se manifiesta claramente al exterior y el número de elementos de conexión requerido para transmitir adecuadamente los elevados axiles de las barras es muy elevado, so pena de reducir de forma drástica el rendimiento de las barras.

En este punto se plantea la colocación de un taco de madera maciza, con un tubo roscado en su interior encolado en el interior de la barra hueca. La unión con el nudo de enlace de barras se realiza mediante la disposición de un tornillo de alta resistencia. Esta solución de nudo extremo de barra permite la realización de uniones compactas sin los problemas de excentricidad asociados a la tipología de módulos semicuboctaédricos apilables.

Con el empleo de la tipología de mallas formadas por módulos semiocotáedricos ensamblados por diagonales paralelas a bordes se mantiene el carácter modular de la estructura, sobrepasando el concepto de estructura formada por barras aisladas, mediante la agrupación de estas en unidades superiores.

El enlace de las barras del módulo semiocotáedrico precisa del diseño de dos tipos de nudos. El diseño ha de responder a una serie de objetivos prefijados:

- ❑ Los ejes de las barras han de confluir en un punto para evitar la aparición de excentricidades en la transmisión de esfuerzos, tanto a nivel de las barras que constituyen el módulo, como en el enlace entre módulos.
- ❑ Adecuación del diseño para la construcción de estructuras de simple curvatura.
- ❑ Posibilidad de alojamiento parcial del nudo dentro de las barras huecas, al objeto de potenciar la imagen de estructura “de madera”.
- ❑ Accesibilidad al interior de los nudos para permitir la ejecución de los enlaces de barras.

La respuesta a estas exigencias se alcanzan de forma satisfactoria mediante la utilización de una chapa metálica, que por plegado conforma un anillo que resuelve tanto la conexión de barras mediante tornillos de acero de alta resistencia como la conexión diagonal entre módulos. Otra chapa plegada, soldada al anillo perimetral, recoge la barra diagonal que parte del nudo.

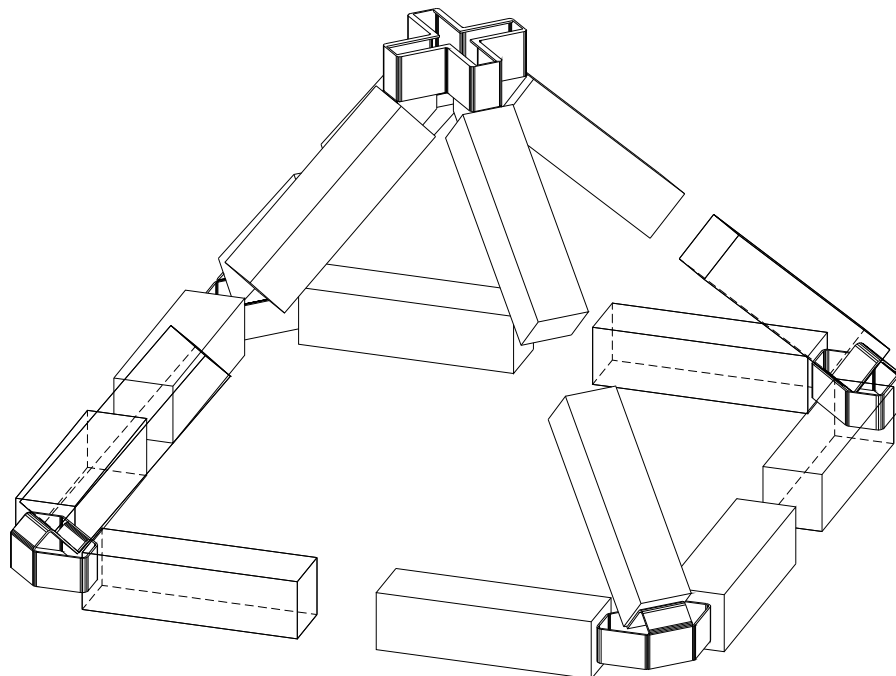


Ilustración II-36.- Módulo semiocotáedrico.

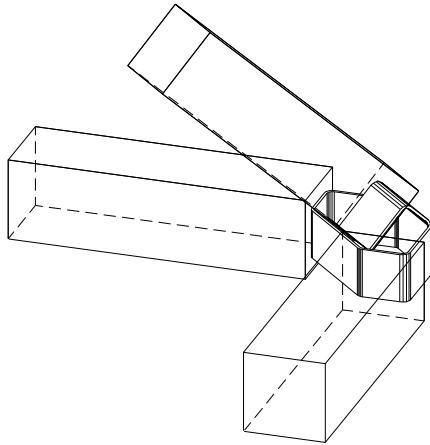


Ilustración II-37.- Detalle de nudo inferior.
Módulo semioctaédrico

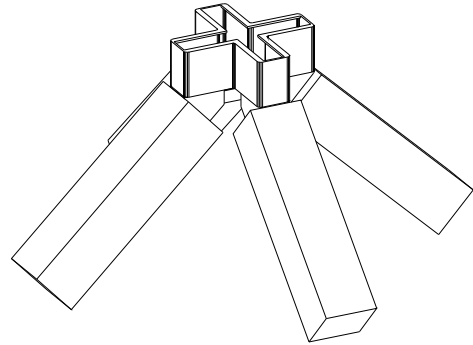
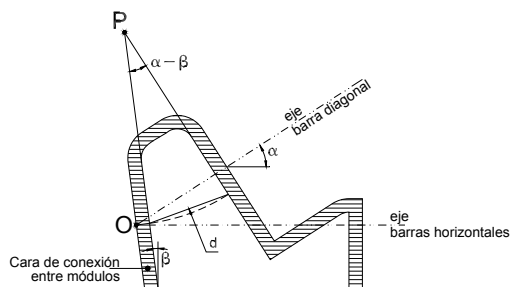
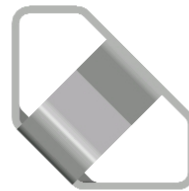


Ilustración II-38.- Detalle de nudo superior
Módulo semioctaédrico



PLANTA



ALZADO

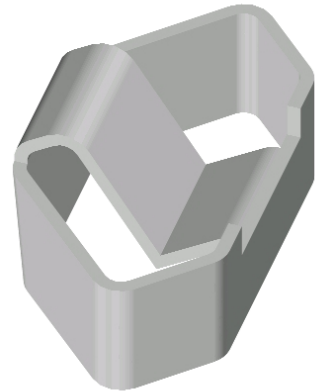
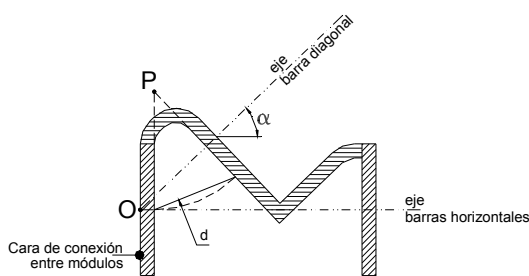


Ilustración II-39.- Detalle de nudo inferior de malla cilíndrica.



PLANTA



ALZADO

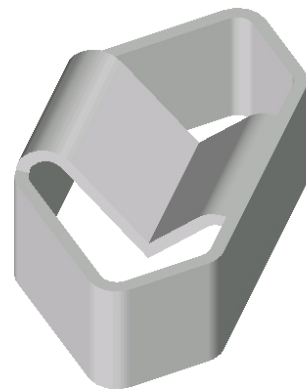


Ilustración II-40.- Detalle de nudo inferior de malla plana. Tesis doctoral Javier Álvarez Pablos

Las figura anteriores muestran distintas vistas de los nudos que conformarían la base del módulo correspondiente a una malla plana o una malla cilíndrica. Para conformar una malla de simple curvatura es suficiente establecer un giro en la cara de conexión entre módulos, no viéndose afectada la geometría restante. Las dimensiones del nudo permiten su alojamiento parcial en las barras de modo que resulta oculto prácticamente en su totalidad una vez construido el módulo.

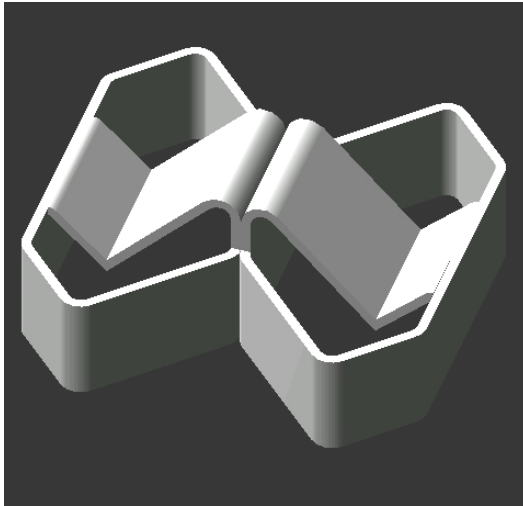


Ilustración II-41.- Enlace de nudos entre módulos

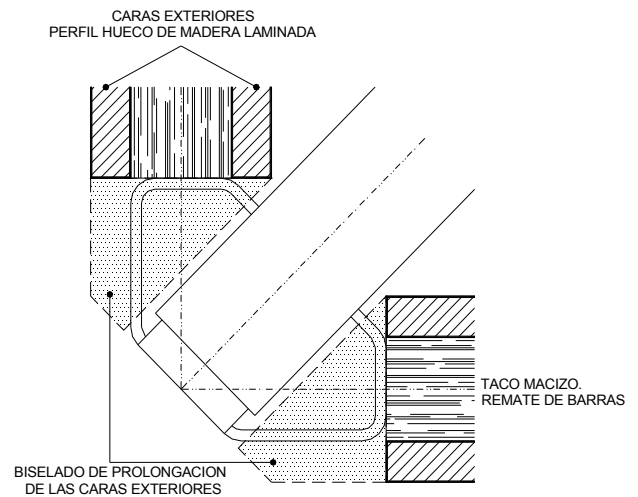


Ilustración II-42.- Planta de nudo con ocultación parcial de los elementos metálicos.

El nudo superior del semioctaedro debe además de resolver el encuentro de las barras diagonales, de servir de enlace entre los recuadros que completan la malla.

Si en el nudo inferior las barras diagonales y las que definen la base del módulo se encontraban en planos verticales distintos, ahora todas las barras están contenidas en dos planos ortogonales. Frente al hexágono irregular que resolvía la confluencia de barras y la conexión entre módulos, en este caso es necesario el planteamiento de esquemas que geométricamente respondan a secciones de planta cuadrada, octogonales o en cruz.

El nudo se genera a partir de una chapa que por plegado, adquiere forma de cruz. A partir de la misma chapa se conforman asimismo las caras de contacto con las barras diagonales y un reborde inferior que permite la soldadura de las chapas laterales de rigidización.

Los nudos correspondientes a los recuadros se encajan superiormente, siendo posible el acceso a los elementos de fijación a través del hueco dejado por la prolongación de las caras superiores de las barras

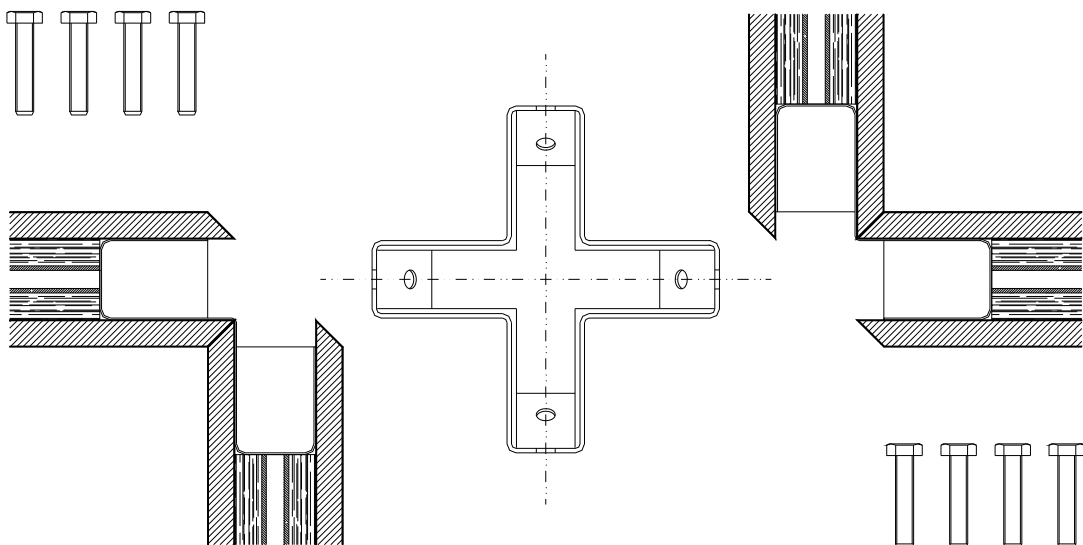


Ilustración II-43.- Despiece del nudo superior de enlace

En las secciones se aprecia cómo después de completar la malla con los recuadros que conforman su cara inferior, el nudo queda oculto en su práctica totalidad.

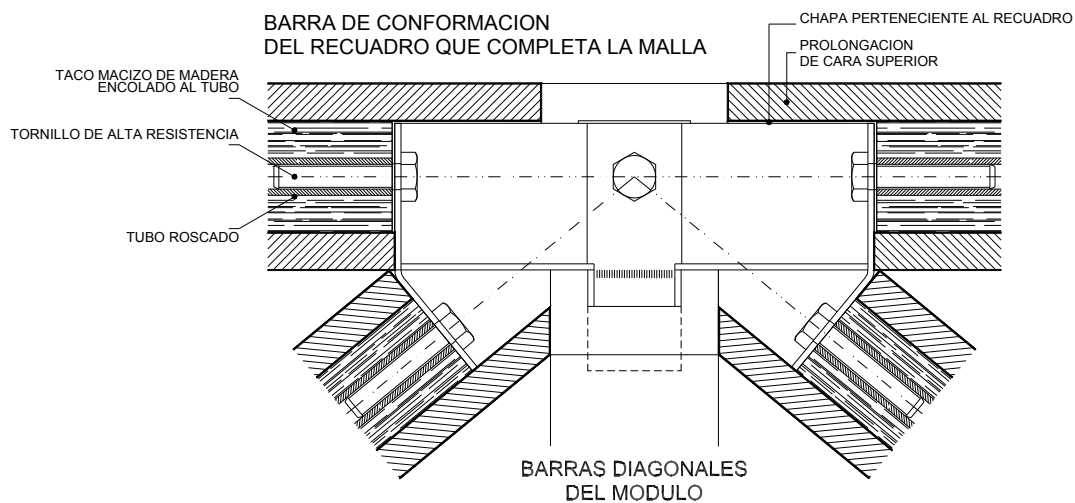


Ilustración II-44.- Sección vertical del nudo superior de malla plana

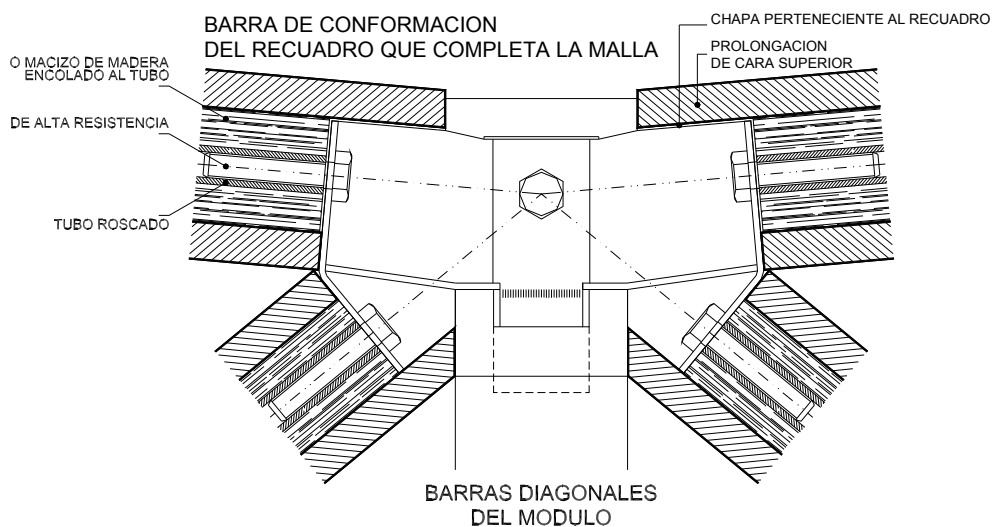


Ilustración II-45.- Sección vertical del nudo superior de malla cilíndrica

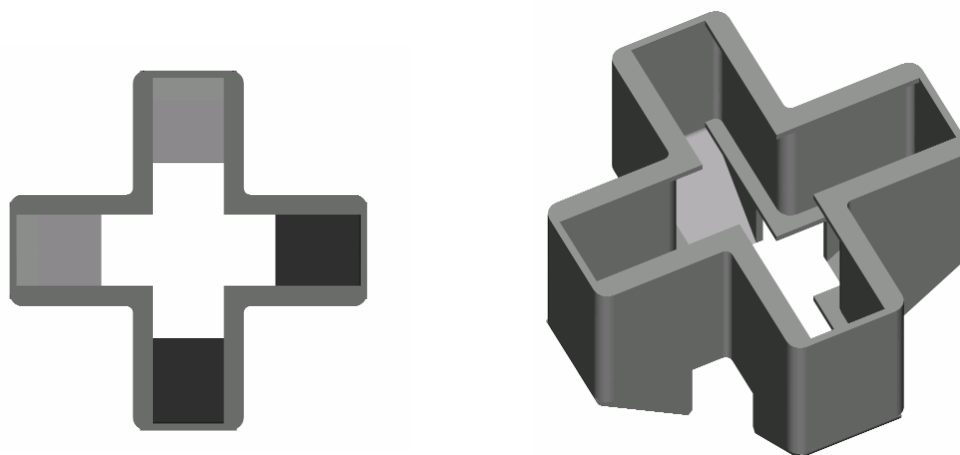


Ilustración II-46.- Planta y axonometría del nudo superior para malla de módulo semiocetaédrico.

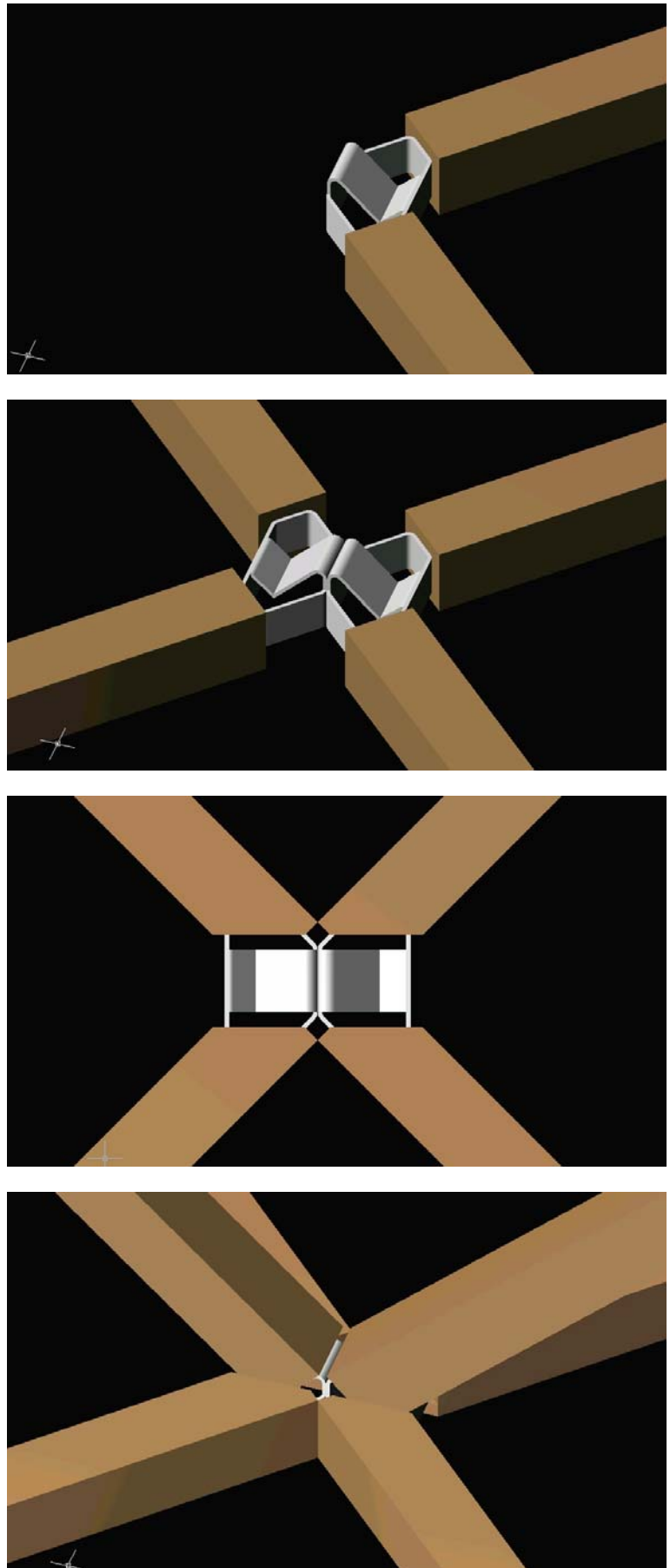


Ilustración II-47.- Secuencia de ensamble de módulos y barras en el nudo inferior.

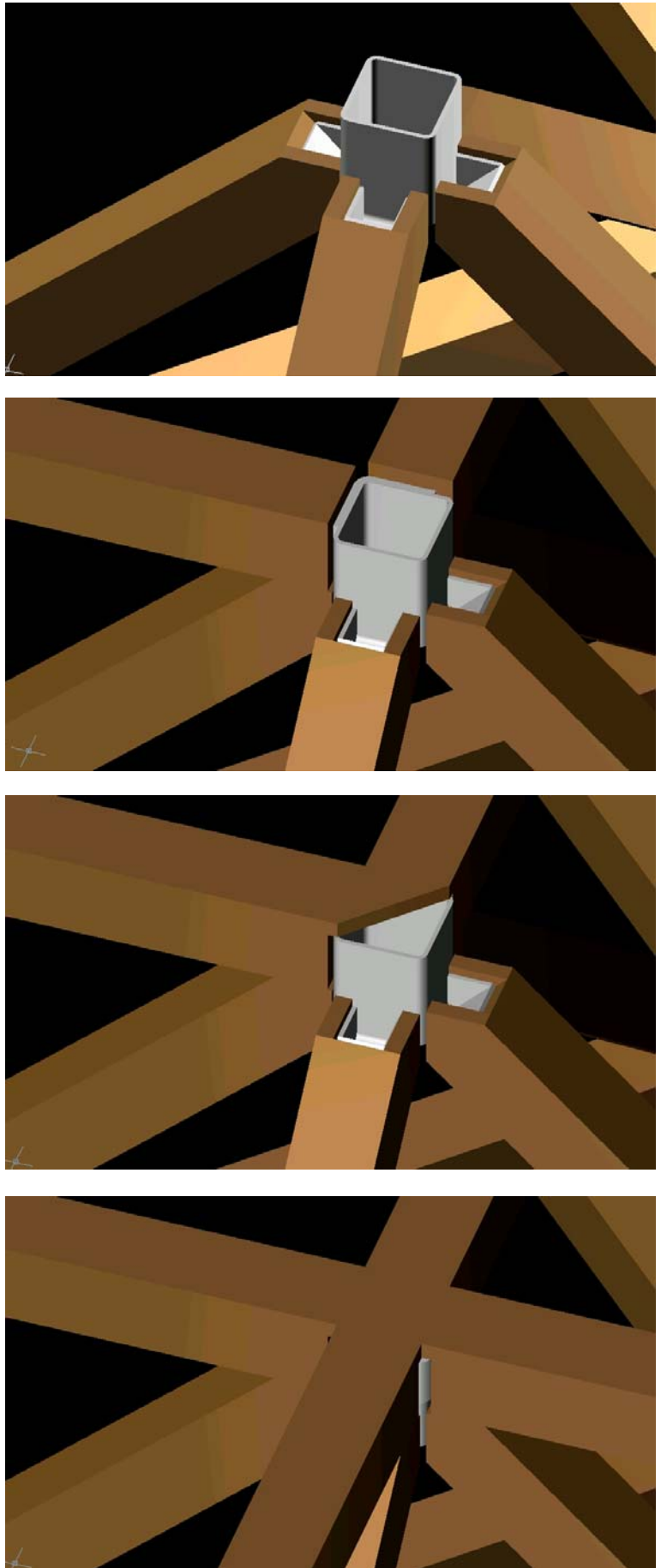


Ilustración II-48.- Secuencia de ensamble de módulos y barras en el nudo superior

II.- BARRAS HUECAS DE MADERA.

5.- DISEÑO Y DIMENSIONADO DE ENLACE EXTREMO DE BARRA

DISEÑO DEL ENLACE EXTREMO DE BARRA.

Recogiendo la experiencia de propuestas anteriores, el diseño del enlace extremo de barra se centra en la disposición de una pieza de enlace de madera maciza de alta densidad (frondosa de elevada clase resistente) que se ensambla al tubo de madera y sirve, a su vez, para alojar un vástago metálico encolado. La unión de las barras al nudo se realiza simplemente mediante la colocación de las correspondientes arandelas y tuercas de fijación.

Esta solución mantiene la unión oculta al exterior, cierra el tubo de madera, con lo que se resuelve el problema de la resistencia al fuego, y el vástago metálico queda protegido por toda la madera circundante. Su ejecución es sumamente sencilla sin la necesidad de utilizar ningún tipo de medios adicionales.

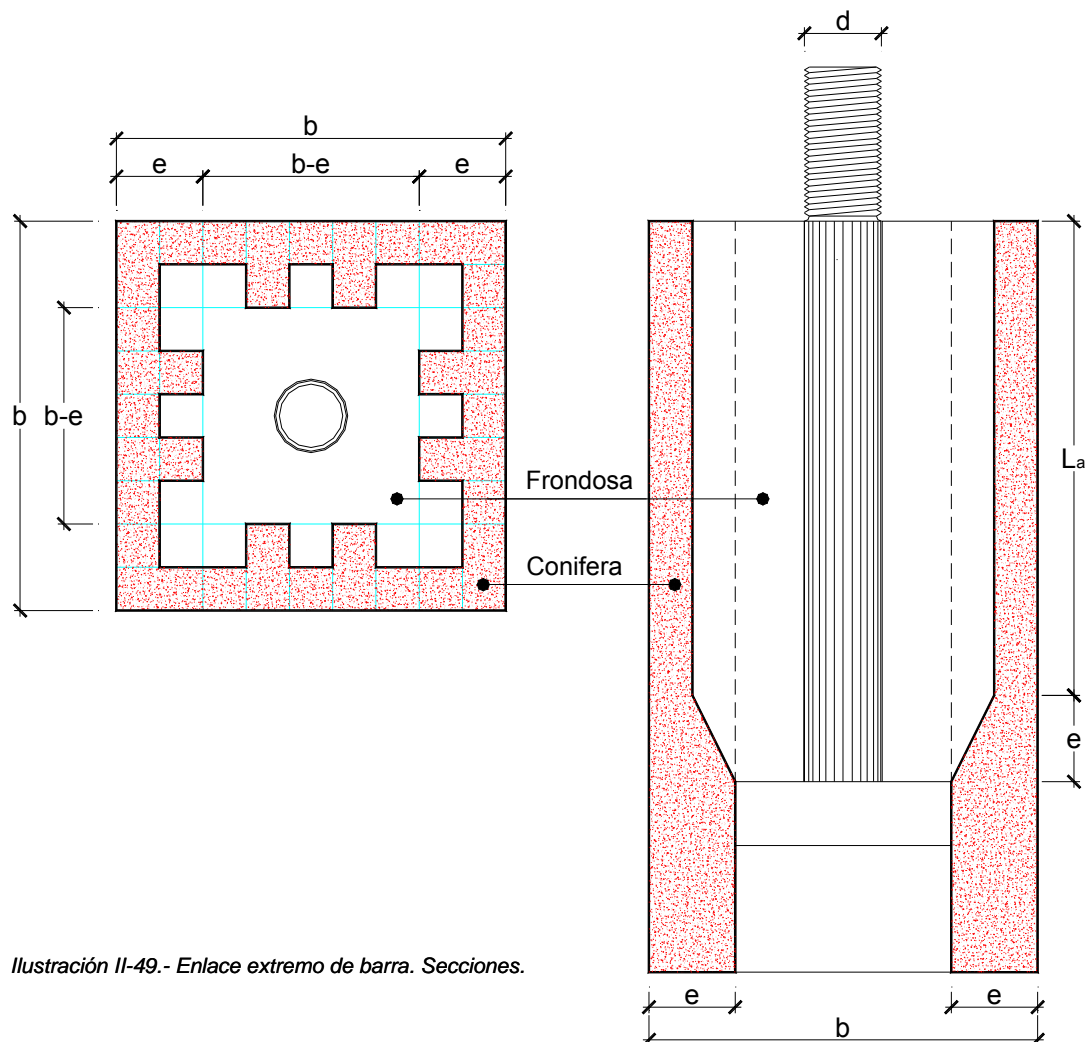


Ilustración II-49.- Enlace extremo de barra. Secciones.

El diseño de enlace extremo admite diferentes soluciones en cuanto a la superficie de contacto entre las dos especies de madera; estas propuestas reducen el numero de operaciones necesarias para su elaboración abaratando el proceso a costa de una “teórica” menor eficacia estructural.

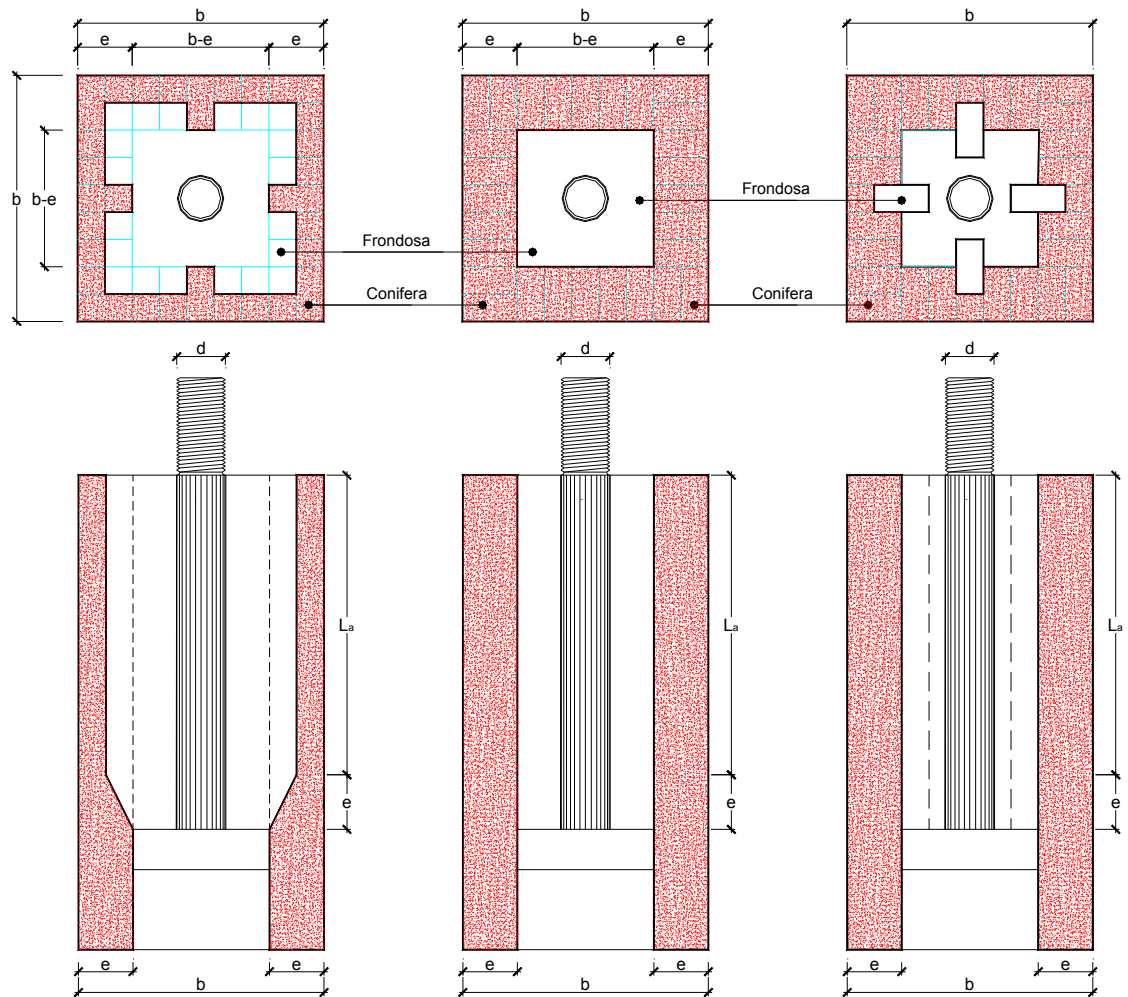


Ilustración II-50.- Enlace extremo de barra. Secciones.

DIMENSIONADO DE LOS ENLACES EXTREMOS DE BARRA

Para abordar el dimensionado del enlace hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- ❑ Axil transmitido por la barra
- ❑ Capacidad resistente por cortante del enlace entre maderas
- ❑ Capacidad resistente del vástago metálico teniendo en cuenta el axil a transmitir y su comportamiento mecánico como barra encolada.

AXIL DE CÁLCULO DEL ENLACE

El primer factor a considerar es la determinación del axil que debe soportar el enlace. Atendiendo a criterios de uniformización modular y de simplificación del proceso constructivo, el dimensionado de barras no va a ser estricto. Ello quiere decir que se vincula el dimensionado del enlace con el axil realmente transmitido y no con el de agotamiento de la barra. Ahora bien, este criterio llevaría a dimensionar de forma particular cada unión, lo que generaría una enorme casuística que conduciría a una complicación del proceso constructivo y a un encarecimiento de los costes de fabricación. Es por ello que se ha optado por dimensionar el enlace con el axil de cálculo correspondiente a las dimensiones de la sección, independientemente de su índice de aprovechamiento. Este criterio permite vincular el dimensionado del enlace con el área de la sección transversal de la barra, en lugar de con el axil real que se transmite, permitiendo tipificar las uniones a realizar.

La segunda cuestión que suscita la determinación del valor de cálculo del axil que debemos considerar en el dimensionado del nudo extremo de barra, es si éste debe ser el de tracción o el de compresión. Parece claro que el dimensionado pésimo siempre corresponderá al axil de tracción, y ello por dos razones: por una parte, porque a pesar de que la resistencia característica a compresión supera a la de tracción para una clase resistente dada, en las esbelteces habituales en estas estructuras, generalmente superiores a la esbeltez euleriana, los términos se invierten siendo superior, para una sección dada, el valor de cálculo a tracción que a compresión. Podemos determinar dichos valores de esbeltez igualando las expresiones de cálculo del axil a tracción y compresión.

$$K_{mod} \cdot K_h \cdot K_{ls} \cdot A_{neta} \cdot \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} = K_c \cdot K_{mod} \cdot K_{ls} \cdot A \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M}$$

Teniendo en cuenta, tal y como posteriormente veremos, que $A_{neta} \approx 0,85 \cdot A$ llegamos a:

$$K_c \approx 0,85 \cdot K_h \cdot \frac{f_{t,0,k}}{f_{c,0,k}}$$

La anterior expresión del coeficiente K_c de reducción al pandeo conduce a las siguientes esbelteces reducidas y mecánicas para cada clase resistente:

GL24h	$\bar{\lambda} = 1,14$	$\lambda = 70,24$
GL28h	$\bar{\lambda} = 1,09$	$\lambda = 67,16$
GL32h	$\bar{\lambda} = 1,05$	$\lambda = 64,69$
GL36h	$\bar{\lambda} = 0,98$	$\lambda = 60,38$

Pero además de los términos cuantitativos expresados, la razón básica para la consideración del axil de cálculo a tracción en el dimensionado del enlace se basa en que el mecanismo de transmisión de carga, tal y como se puede apreciar en el detalle del nudo de la ilustración [II-49], es notablemente más favorable en compresión debido al contacto del nudo metálico con la totalidad de la superficie de la barra, por tanto se puede concluir que para una sección dada, el enlace dimensionado para el axil de cálculo a tracción resistirá siempre la sollicitación de compresión.

En consecuencia, el axil de diseño viene dado por:

$$N_d = K_{mod} \cdot K_h \cdot K_{ls} \cdot A_{neta} \cdot \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M}$$

Para la determinación del área neta hay que tener en cuenta que en la zona de ensamble entre la madera laminada y la frondosa aserrada, la existencia de juntas de solapa o biseladas reducen la eficiencia del enlace, por lo que debemos afectar la resistencia de dicha zona, por un factor de junta K_j .

Por tanto, el área neta se expresa como:

$$A_{neta} = A - (1 - K_j) \cdot A_j$$

siendo A_j , el área de la parte de sección ensamblada afectada por el factor de junta que viene dada, de acuerdo con la ilustración [II-49], por:

$$A_j = 4 \cdot \left[\frac{3}{5} \cdot (b - 2 \cdot e) + \frac{e}{2} \right] \cdot \frac{e}{2} = 1,2 \cdot e \cdot (b - 2 \cdot e) + e^2$$

Para la pendiente adoptada en la junta de solapa puede aceptarse, $K_j \approx 0,50$ con lo que nos queda:

$$A_{neta} \approx 4 \cdot e \cdot (b - e) - \frac{1}{2} \cdot \left[1,2 \cdot e \cdot (b - 2 \cdot e) + e^2 \right] = 3,40 \cdot e \cdot (b - 0,9706 \cdot e) \approx 3,40 \cdot e \cdot (b - e)$$

Por tanto, por el lado de la seguridad adoptamos como expresión de A_{neta} :

$$A_{neta} = 3,40 \cdot e \cdot (b - e)$$

Como puede observarse, la expresión del área neta representa el 85% del área bruta de la sección transversal.

En definitiva, el axil de cálculo a tracción se expresa como:

$$N_u = K_{mod} \cdot K_h \cdot K_{ls} \cdot 3,40 \cdot e \cdot (b - e) \cdot \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_m}$$

LONGITUD DE ENSAMBLE ENTRE MADERAS

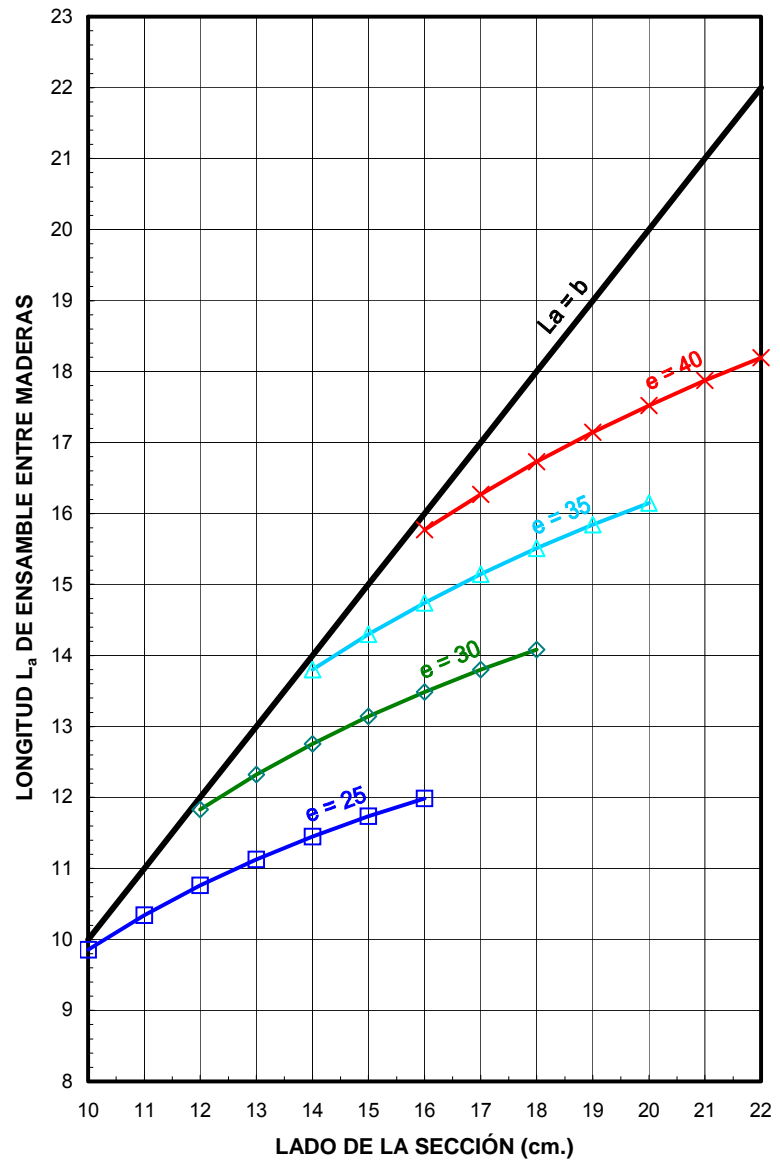
Conocida la expresión del axil de cálculo del enlace, se puede calcular la longitud que por resistencia a cortante se necesita para ensamblar ambas maderas (laminada y frondosa "D70"). Para ello, aplicando la comprobación de estados límites últimos al esfuerzo cortante, se obtiene el máximo axil que puede soportar el enlace en función de la longitud "L_a" de contacto entre maderas; igualando dicho axil con el de cálculo obtenido en el apartado anterior, se llega a la expresión de L_a:

$$\tau_d = \frac{N_d}{4 \cdot \left(b - e + \frac{4 \cdot e}{2} \right) \cdot L_a} \leq f_{v,d} = K_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad N_d = K_{mod} \cdot 4 \cdot (b + e) \cdot L_a \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M}$$

$$K_{mod} \cdot K_h \cdot K_{ls} \cdot 3,4 \cdot e \cdot (b - e) \cdot \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} = K_{mod} \cdot 4 \cdot (b + e) \cdot L_a \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M}$$

$$L_a = 0,85 \cdot K_h \cdot K_{ls} \cdot \frac{e \cdot (b - e)}{b + e} \cdot \frac{f_{t,0,k}}{f_{v,k}}$$

LONGITUD L _a DE CONTACTO ENTRE MADERAS																	
		GL24h				GL28h				GL32h				GL36h			
		ESPESOR e (mm.)				ESPESOR e (mm.)				ESPESOR e (mm.)				ESPESOR e (mm.)			
		25	30	35	40	25	30	35	40	25	30	35	40	25	30	35	40
LADO b DE LA SECCIÓN (cm.)	10	9.86				9.14				8.88				9.07			
	11	10.34				9.59				9.32				9.52			
	12	10.76	11.83			9.98	10.97			9.70	10.66			9.90	10.88		
	13	11.13	12.32	13.80		10.32	11.43			10.03	11.10			10.24	11.34		
	14	11.45	12.76	14.30		10.62	11.83	12.80		10.32	11.49	12.43		10.54	11.74	12.70	
	15	11.73	13.14	14.74		10.88	12.19	13.26		10.57	11.84	12.88		10.80	12.09	13.16	
	16	11.99	13.49	15.15	15.77	11.12	12.51	13.67	14.63	10.80	12.15	13.28	14.21	11.03	12.41	13.57	14.51
	17		13.80	15.51	16.27		12.80	14.05	15.09		12.43	13.65	14.66		12.70	13.94	14.97
	18		14.08	15.84	16.73		13.06	14.38	15.51		12.69	13.98	15.07		12.96	14.27	15.39
	19			16.15	17.14			14.69	15.90			14.28	15.45			14.58	15.77
	20				17.52			14.98	16.25			14.55	15.79			14.86	16.12
	21				17.87				16.58				16.11				16.45
22				18.20				16.88				16.40				16.74	



La tabla anterior pone de manifiesto que las diferencias entre clases resistentes son despreciables. Ello es consecuencia de que el cociente entre los valores característicos de resistencia a tracción y cortante es prácticamente el mismo para todas las clases resistentes y sus mínimas diferencias son realmente consecuencia del redondeo adoptado en los valores resistentes de cada clase. Es por ello que se pueden adoptar directamente los valores de L_a correspondientes a la clase **GL24h**, por ser éstos los más desfavorables.

Ahora bien, en orden al establecimiento de un criterio simple que facilite la tipificación de las secciones y por tanto su ejecución, se adopta, por el lado de la seguridad, el valor de:

$$L_a = b$$

DIMENSIONADO DEL VÁSTAGO.

El tipo de acero elegido tanto para la ejecución del vástago como para las tuercas es A8t (8.8 ISO) cuyas principales características mecánicas son:

- ❑ Resistencia a la tracción $\sigma_{R-min} = 800 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{R-max} = 1000 \text{ N/mm}^2$.
- ❑ Límite elástico convencional $\sigma_e = 640 \text{ N/mm}^2$.

Para el dimensionado del vástago, en principio la sección más desfavorable es la parte roscada por cuanto el área resistente es ligeramente menor que en la zona de fuste. El valor del axil de agotamiento lo obtenemos aplicando la expresión:

$$N_u = 0,80 \cdot \sigma_e \cdot A_r$$

No obstante, dado que para la determinación de la longitud de anclaje como barra encolada la máxima tensión aceptable es de 400 N/mm^2 , dicho límite va a ser siempre más desfavorable, con lo que directamente podemos trabajar con dicho valor de tensión y el área del fuste en lugar del área resistente del tornillo.

En consecuencia, el diámetro necesario para soportar el axil de cálculo será:

$$d \geq \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot \frac{f_{u,k}}{\gamma_a}} \cdot K_{mod} \cdot K_{ls} \cdot A_{neta} \cdot \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M}}$$

DIÁMETRO DEL VÁSTAGO																	
		GL24h				GL28h				GL32h				GL36h			
		ESPESOR e (mm.)				ESPESOR e (mm.)				ESPESOR e (mm.)				ESPESOR e (mm.)			
		25	30	35	40	25	30	35	40	25	30	35	40	25	30	35	40
LADO b DE LA SECCIÓN (cm.)	10	20				20				22				24			
	11	20				22				24				27			
	12	22	22			22	24			24	27			27	30		
	13	22	24			24	27			27	30			27	30		
	14	24	27	27		27	30	30		27	30	30		30	33	33	
	15	24	27	30		27	30	33		30	30	33		30	33	36	
	16	27	27	30	30	27	30	33	33	30	33	36	36	33	33	36	39
	17		27	30	33		30	33	36		33	36	39		36	39	42
	18		30	30	33		33	33	36		33	36	39		36	39	42
	19			33	36			36	39			36	39			39	42
	20			33	36			36	39			39	42			42	45
	21				36				39				42				45
	22				36				39				42				45

Los diámetros normalizados que figuran en la tabla adjunta se han obtenido con los valores que a continuación se señalan.

K_{mod}	0,90	γ_a	1,10	$f_{t,o,k}$	GL24h	16,5 N/mm ² .
K_h	1,15	γ_M	1,30		GL28h	19,5 N/mm ² .
K_{ls}	1,10	$f_{u,k}$	400 N/mm ² .		GL32h	22,5 N/mm ² .
A_{neta}	3,4.e.(b-e)				GL36h	26 N/mm ² .

La capacidad de carga característica axial para el esfuerzo de tracción y compresión de una barra encolada la obtenemos aplicando las expresiones de Riberholt⁸⁸ fundamentadas en los trabajos experimentales realizados por el citado autor.

$$R_{ax,k} = f_{wl} \cdot \rho_k \cdot d \cdot L_g \quad \text{para } L_g < 200 \text{ mm.}$$

$$R_{ax,k} = f_{ws} \cdot \rho_k \cdot d \cdot \sqrt{L_g} \quad \text{para } L_g \geq 200 \text{ mm.}$$

donde

$R_{ax,k}$ Capacidad de carga característica axial en N.

f_{ws} Parámetro de resistencia en N/mm^{1,5}.
En adhesivos tipo resina epoxi toma el valor 0,520

f_{wl} Parámetro de resistencia en N/mm.
En adhesivos tipo resina epoxi toma el valor 0,037

ρ_k Densidad característica de la madera en Kg/m³.

d Diámetro del vástago en mm.

L_g Longitud encolada en mm.

Además del axil resistido por el vástago como barra encolada, se transmite axil a través de la chapa de remate del vástago que comprime la pieza ensamblada de madera frondosa. Por tanto, el axil de agotamiento del enlace, a falta de su comprobación experimental, lo obtenemos como suma del soportado como barra encolada más el transmitido por compresión sobre el taco ensamblado. Es decir:

$$N_{d, enlace} = R_{ax, d} + \frac{K_{mod}}{\gamma_M} \cdot \left[(b - 2 \cdot e)^2 - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right] \cdot f_{c,0,k}$$

$$N_{d, enlace} = \frac{K_{mod}}{\gamma_M} \cdot \left[f_{wl} \cdot \rho_k \cdot d \cdot L_g + \left[(b - 2 \cdot e)^2 - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right] \cdot f_{c,0,k} \right] \quad \text{para } L_g < 200 \text{ mm.}$$

$$N_{d, enlace} = \frac{K_{mod}}{\gamma_M} \cdot \left[f_{ws} \cdot \rho_k \cdot d \cdot \sqrt{L_g} + \left[(b - 2 \cdot e)^2 - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right] \cdot f_{c,0,k} \right] \quad \text{para } L_g \geq 200 \text{ mm.}$$

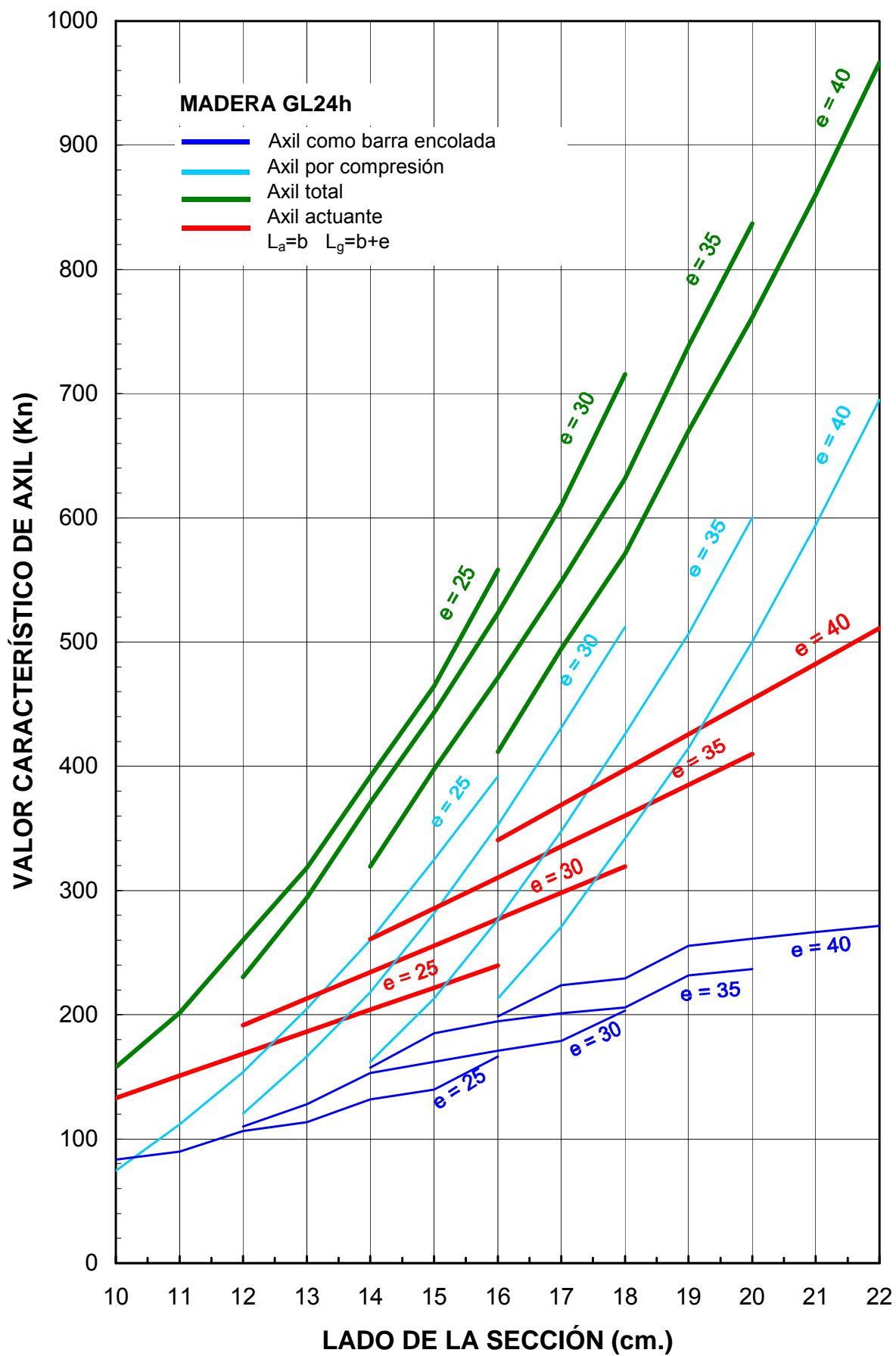
Para unas dimensiones de sección dadas, el diámetro del vástago está determinado de acuerdo con la tabla anterior. Asimismo, dado que la madera frondosa escogida es siempre de la clase resistente **D70**, independientemente de la clase resistente de la madera laminada, se concluye que el sumando correspondiente a la contribución resistente por compresión sobre la madera ensamblada no varía con la clase resistente de madera laminada empleada. Es por ello, que la longitud de encolado de la barra tiene que ser mayor a medida que aumentamos la clase de la madera laminada. Con estos criterios, y con el objetivo de tipificar dimensiones, se han adoptado los siguientes valores **L_g**:

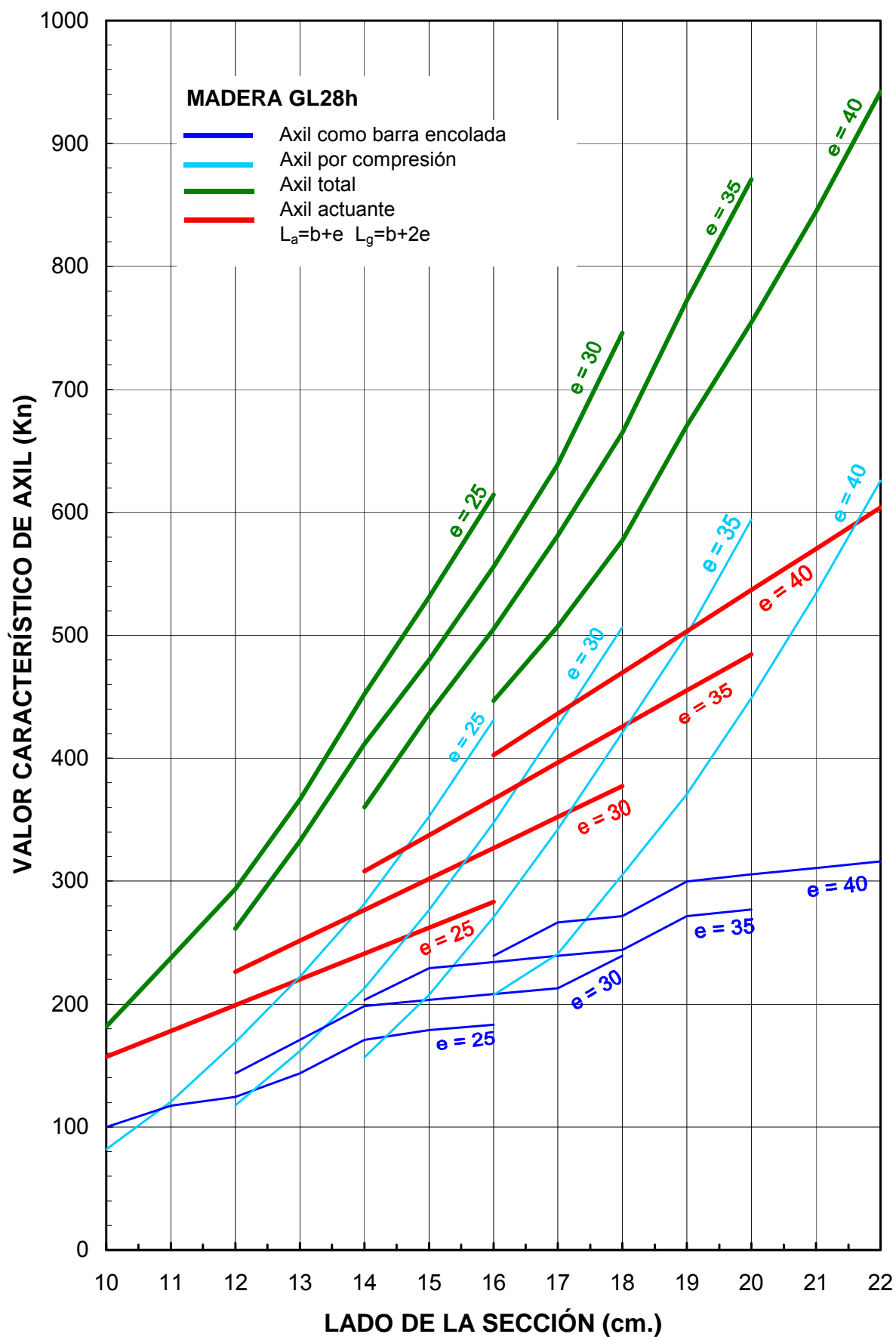
GL24h	$L_a = b$	$L_g = b + e$
GL28h	$L_a = b + e$	$L_g = b + 2e$
GL32h	$L_a = b + 2e$	$L_g = b + 3e$
GL36h	$L_a = b + 3e$	$L_g = b + 4e$

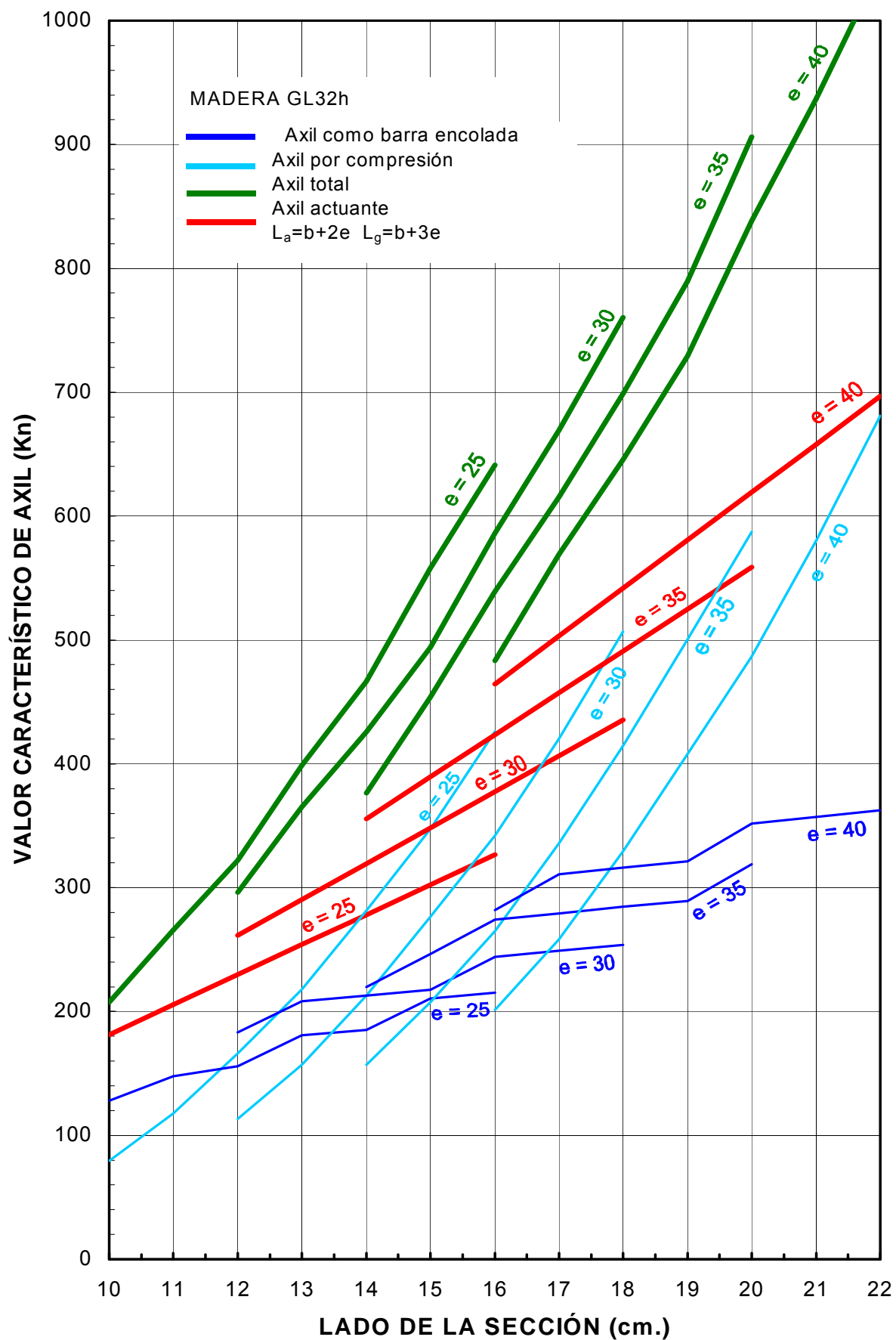
En las gráficas que se acompañan se han representado, para las cuatro clases resistentes de madera laminada, las curvas correspondientes al axil de cálculo a tracción que debe soportar el enlace, la contribución resistente por compresión sobre la madera ensamblada, la contribución resistente como barra encolada con el **L_g** correspondiente a la clase resistente y, finalmente, las curvas relativas a la capacidad resistente total dadas por **N_{d, enlace}**.

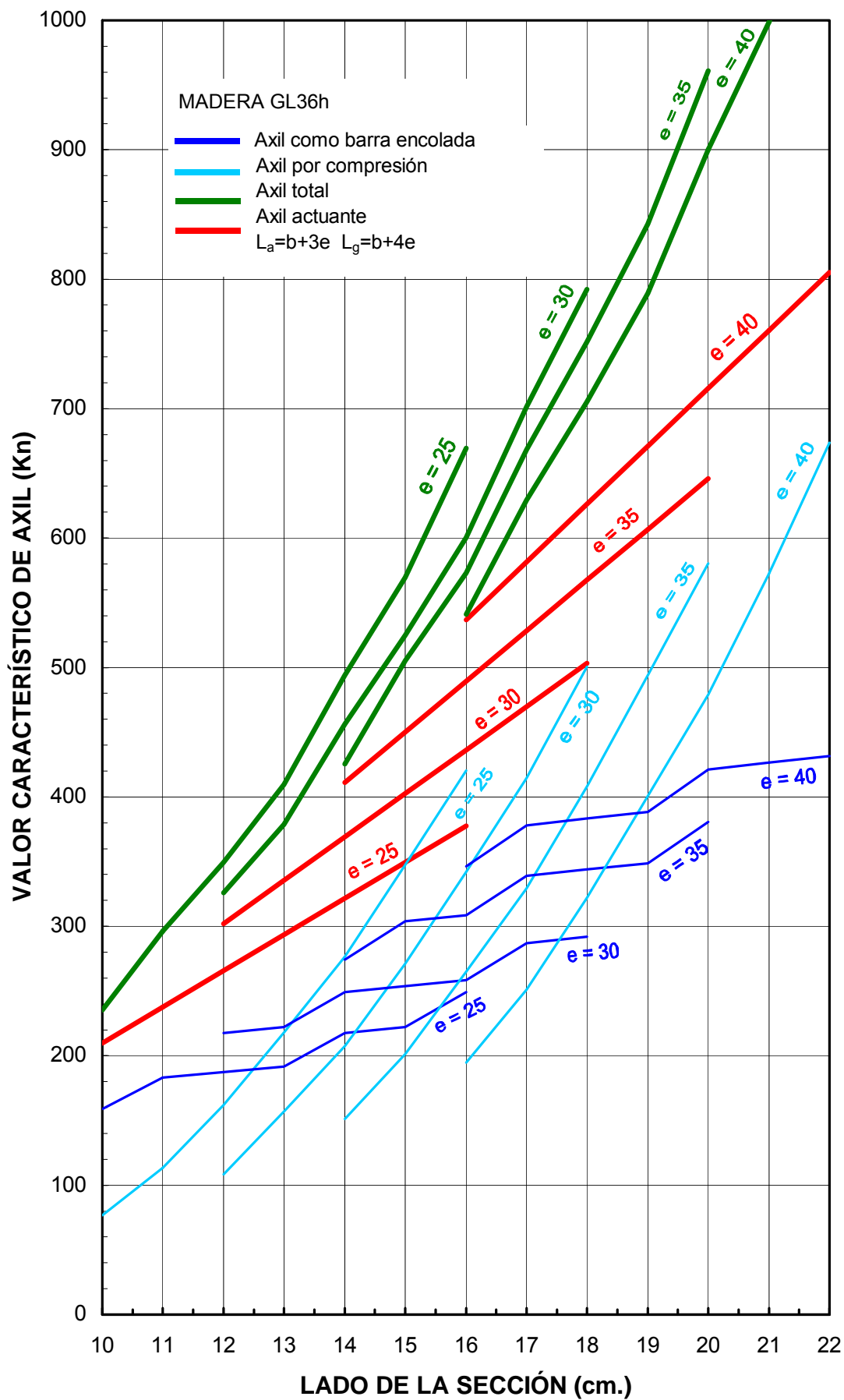
Es importante señalar que la representación se ha realizado adoptando el valor característico en lugar del valor de cálculo para evitar la distinción entre diferentes clases de servicio.

Dichas curvas ponen de manifiesto como para un espesor de pared dado, la contribución por compresión y como barra encolada es del mismo orden para los lados menores de sección, acrecentándose notablemente la diferencia entre ambos valores resistentes a medida que aumenta el lado de la sección permaneciendo constante el espesor de pared.









II.- BARRAS HUECAS DE MADERA.

6.- ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Un aspecto imprescindible en el desarrollo de la investigación que se recoge en la presente tesis doctoral es el de la validación del comportamiento de los enlaces diseñados para el enlace extremo de barra, mediante la realización de una serie de campañas de ensayos experimentales. Para la ejecución de las probetas a ensayar se estableció un convenio de colaboración con la empresa especializada en la construcción de estructuras de madera laminada “Carames Seoane, S.L.”. Dado el reducido presupuesto para la ejecución de las probetas se optó en un principio por la eliminación del machihembrado entre la sección hueca y la pieza maciza de extremo, que al exigir una ejecución cuidada difícil de garantizar, incrementaba de forma notable su coste de fabricación. La reducción del perímetro a cortante se compensó aumentando la longitud L_a de contacto entre las piezas.

El diseño del enlace del extremo de barra a construir para la realización de las campañas de ensayos se muestra en la ilustración

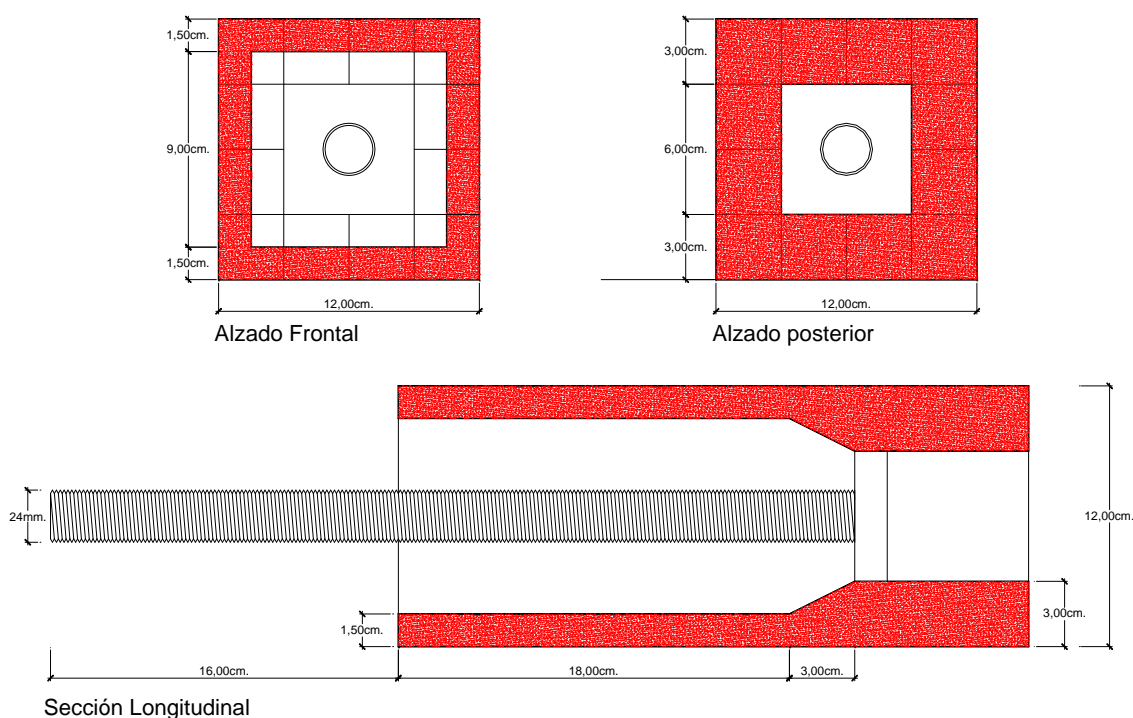


Ilustración II-51.- Definición geométrica del enlace extremo de barra a ensayar.

Se confeccionaron cuatro probetas para el ensayo de tracción y cuatro probetas para el de compresión. Las probetas se construyeron con laminas de madera de la especie arborea abeto (*Picea abies*) pegada con cola de resorcina, con una calidad **T2**, según *INSTA “Nordic visual stress grading rules for timber”*, que equivale a la clase resistente **C30** en madera aserrada, cuya correspondencia con la clase resistente de la madera laminada encolada es **GL28h**. En las uniones extremo se empleó madera frondosa de elondo, con una densidad media de 840 kg/m^3 , lo que equivale a una clase resistente D60. La unión del vástago roscado se realizó con resina epoxi para inyecciones de dos componentes SIKADUR 52 Inyección.

Sikadur 52 Inyección. Datos Técnicos		
Densidad:	1,09 kg/l.	
Proporciones de mezcla en peso:	Componente A: 2 partes, Componente B: 1 parte	
Resistencia a compresión:	700/900kg/cm ³	
Modulo de elasticidad (aprox.):	2.365 kg/cm ²	
Adherencia por tracción:	Hormigón (Rotura)	> 30kg/cm ²
	Acero (Previo chorreado)	100 kg/cm ²



Ilustración II-52.- Detalle de la ejecución del enlace perno – madera maciza (frondosa)



*Ilustración II-53.- Detalle de la ejecución del enlace extremo de barra
Obsérvese la falta de contacto entre maderas en las esquinas por efecto del
biselado de las caras laminadas.*

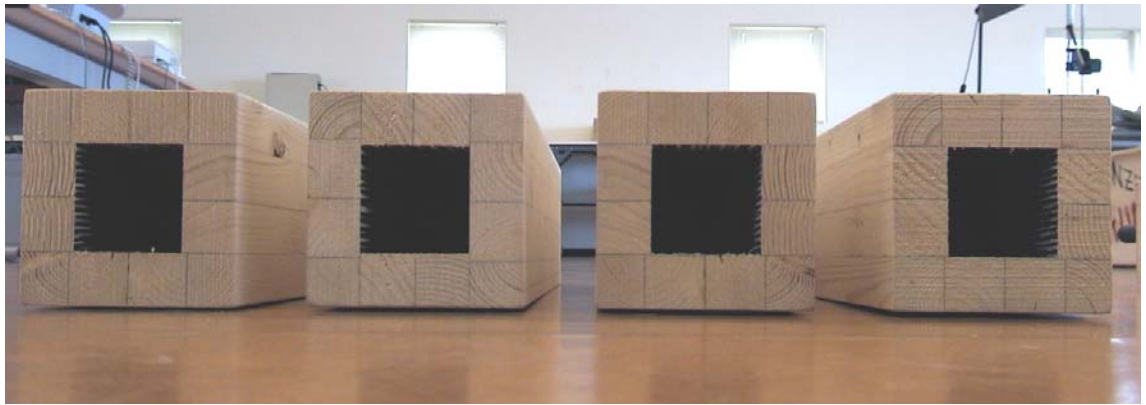


Ilustración II-54.- Detalle de la sección hueca de las piezas de madera

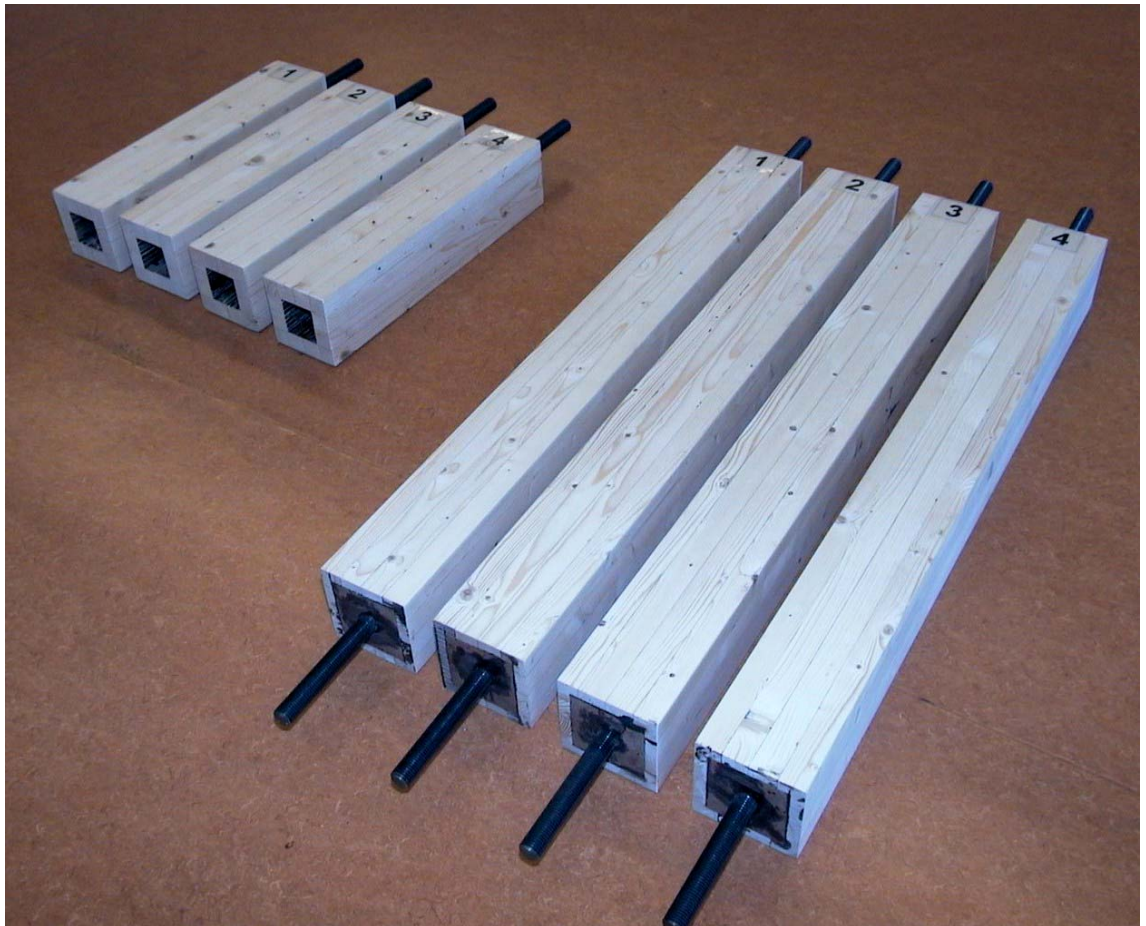


Ilustración II-55.- Probetas de tracción y compresión

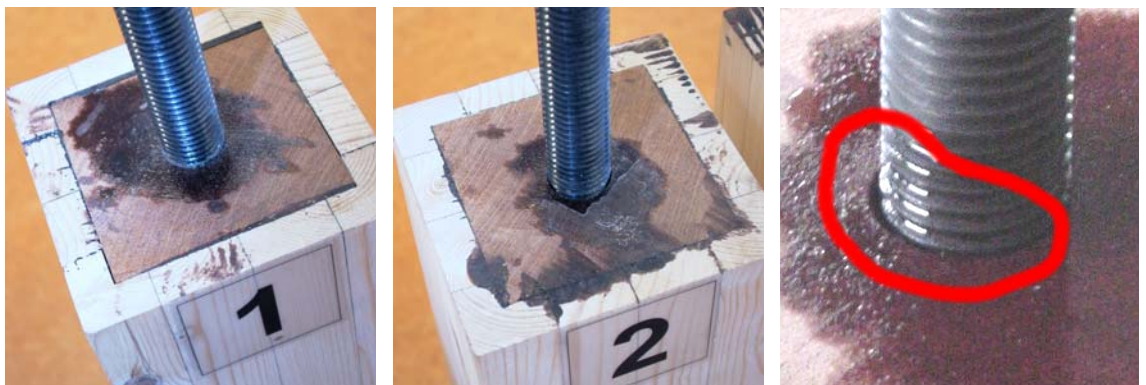


Ilustración II-56.- Detalle del encolado entre perno metálico y macizo de madera. Adhesivo Sikadur 52. Inyección.

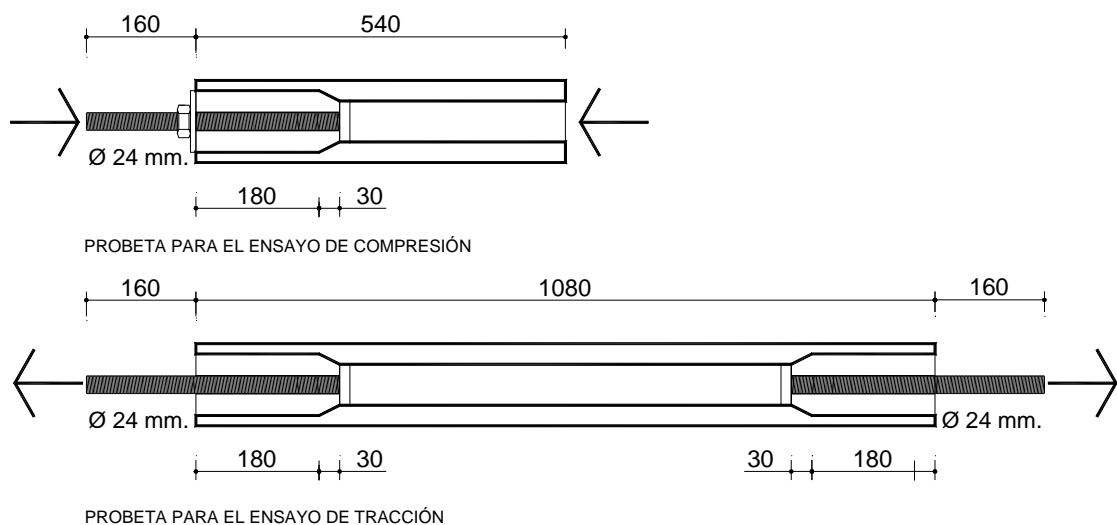
Las ilustraciones precedentes muestran el proceso de confección de las probetas. Es importante observar como la ejecución de las mismas dentro de un proceso manual, no industrializado, presenta deficiencias o problemas que evidentemente, tienen incidencia en su comportamiento y en la capacidad resistente alcanzada:

En primer lugar se aprecia en las ilustraciones de las páginas anteriores como el enlace entre el taco de madera frondosa y las caras laterales de madera laminada no está correctamente realizado, quedando unas esquinas huecas sin contacto entre maderas, precisamente en una zona en la que previsiblemente se producirá una importante concentración de tensiones.

En segundo lugar la construcción de probetas puso de manifiesto la inevitable aparición de holguras en la ejecución del taladro en el taco macizo de frondosa, lo que origina una separación excesiva entre la madera y el vástago metálico, que la resina epoxi empleada no es capaz de cubrir dada su excesivamente fluidez.

Por último, se observan unos errores de alineación en la ejecución de las probetas con unas excentricidades apreciables lo que originará sin duda unas importantes flexiones adicionales.

Para la metodología del ensayo se atendieron las determinaciones de la Norma UNE EN 408 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”. En base a la citada norma, las dimensiones de las probetas son las que figuran en la ilustración:



La determinación de la velocidad de carga debe establecerse de forma que la carga máxima se alcance en un tiempo de 300 ± 120 segundos. En base a ello, y para los valores esperados de carga última se establecen las siguientes velocidades de carga:

ENSAYO DE TRACCIÓN

$$v = 1,1 \text{ kN/seg} \approx 0,01 \text{ mm./seg}$$

ENSAYO DE COMPRESIÓN

$$v = 1,5 \text{ kN/seg} \approx 0,008 \text{ mm./seg}$$

ENSAYOS DE PROBETAS A TRACCIÓN

PRIMERA CAMPAÑA DE ENSAYOS

Si bien la base para la realización de los ensayos experimentales se sitúa en el CENTRO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN EDIFICACIÓN E ENXEÑERÍA CIVIL (CITEEC), centro de reciente creación y en continua expansión perteneciente a la Universidad de A Coruña, en el momento de la disponibilidad de las primeras probetas para la realización de los ensayos de tracción, la prensa dinámica universal del CITEEC carecía de las mordazas necesarias; es por ello que se inicia una búsqueda, restringida al ámbito de la comunidad gallega, de una máquina capaz para realizarlos.

Como resultado de esta búsqueda se contacta con la empresa MEGASA (Metalúrgica Galaica, S.A.), única empresa en la comunidad gallega con una máquina de ensayos con recorrido suficiente para la rotura de las probetas elaboradas. Dicha máquina DARTEC modelo 9610 de 1.200 kN con su correspondiente software está preparada para la realización de ensayos de fatiga en el acero; la imposibilidad de modificar sustancialmente los parámetros de trabajo de la máquina originó la realización de unos ensayos donde las velocidades de carga aplicadas han podido alterar sustancialmente los resultados. Asimismo sus mordazas, ideadas para los ensayos de barras de acero generan un empotramiento en los extremos de las probetas, lo que unido a las inevitables excentricidades producidas en su fabricación produce unos esfuerzos de flexión añadidos que pudieron falsear los resultados del ensayo.



Ilustración II-57.- Máquina de ensayos. Dartec



*Ilustración II-58.- Mordazas hidráulicas. Presión 650 bar. Carga máxima 1200kN.
Se aprecia la excentricidad debida a los defectos de fabricación de las probetas*

En este sentido, las ilustraciones que se acompañan son claramente explicativas de la gran incidencia de este aspecto, lo que aleja los resultados obtenidos de los previsibles en una situación de extremos articulados como la que corresponde al tipo de uniones previstas.

Hay que tener presente que admitidos los extremos empotrados y prescindiendo de fenómenos locales en los enlaces, un desplazamiento impuesto cuya magnitud e se expresa en función del lado b de la sección nos conduce a la siguiente ecuación:

$$\sigma = 3 \cdot \frac{E}{k} \cdot \left(\frac{b}{L} \right)^2 \quad k = \frac{b}{e}$$

Siendo k la relación entre el lado de la pieza y la excentricidad considerada. Es fácil observar como con los valores usuales de módulo de elasticidad y excentricidad, se obtienen tensiones normales próximas a los valores característicos a flexión de la correspondiente clase resistente. En definitiva, las deformaciones impuestas por las mordazas durante el ensayo introducen unas tensiones adicionales que pueden falsear apreciablemente la verdadera capacidad resistente a tracción de las piezas ensayadas.

Al objeto de poder interpretar la bondad de los resultados obtenidos en los ensayos es conveniente determinar los valores resistentes teóricos frente a la sollicitación axil.

Axil característico a tracción paralela calculado en la sección hueca de la barra:

$$N_k = K_h \cdot \left[b^2 - (b - 2 \cdot e)^2 \right] \cdot f_{t,0,k} = 242,19 \text{ kN}$$

Axil característico a tracción paralela calculado en la sección correspondiente al enlace de extremo empleado en las probetas. Dicho axil se ha determinado teniendo en cuenta el área neta correspondiente a las zonas realmente encoladas considerando un factor de junta $K_j = 0,50$.

$$N_k = K_h \cdot A_{\text{neta}} \cdot f_{t,0,k} = 201,82 \text{ kN}$$

Este valor de axil debe reducirse teniendo en cuenta la incidencia de la excentricidad de carga que, para un valor $e = b/20$, nos conduce a los siguientes resultados:

$$e = \frac{b}{20} = 6 \text{ mm.} \quad \gamma_{\text{exc}} = 1,17 \quad N_k = 172,50 \text{ kN}$$

Prescindiendo de la consideración del factor de altura K_h , por cuanto su magnitud está referenciada para piezas de sección maciza y, por tanto, su incidencia en el caso de las secciones huecas es completamente desconocida además de exigir un estudio experimental específico, quedaría:

$$N_k = 150,00 \text{ kN}$$

Los valores anteriores corresponden a una situación teórica. La realidad ha evidenciado factores incidentes más desfavorables que los aquí considerados, pues la excentricidad real se ha movido en un entorno de 10 mm., además de la citada flexión adicional generada por el desplazamiento impuesto en los extremos empotrados.

El valor del axil característico resistido por el vástago como barra encolada será:

$$N_{k, enlace} = f_{ws} \cdot p_k \cdot d \cdot \sqrt{L_g} + \left[(b - 2 \cdot e)^2 - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right] \cdot f_{c,0,k} = 250,13 \text{ kN}$$

PROBETA 1t.

Ante la imposibilidad de realizar modificaciones en el software de control de la máquina de ensayos se realiza este ensayo con la incógnita del tiempo estimado para la transmisión de la carga. La duración del ensayo es de 74,76 seg. produciéndose un incremento de carga de 98kN en tan solo 7 seg. La rotura se produce para un axil de 183,91kN.

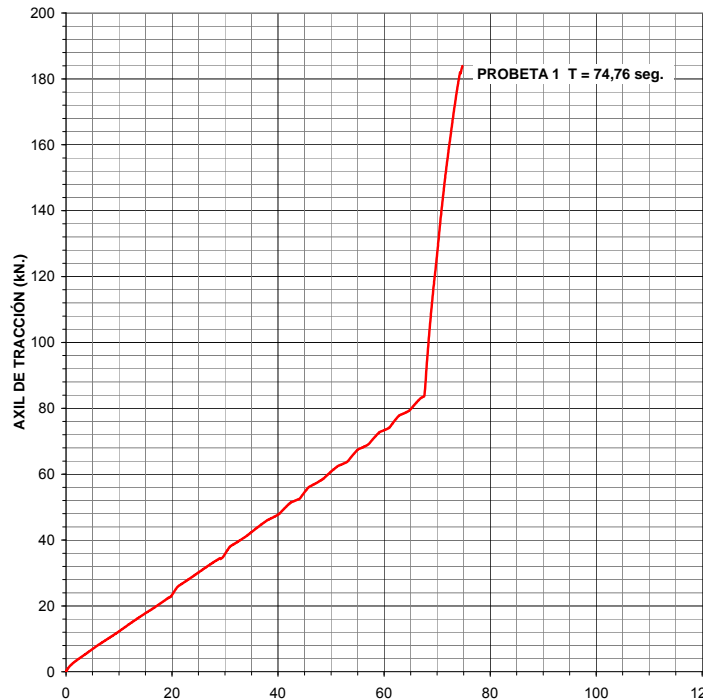


Ilustración II-59.- Gráfica
axil de tracción - tiempo

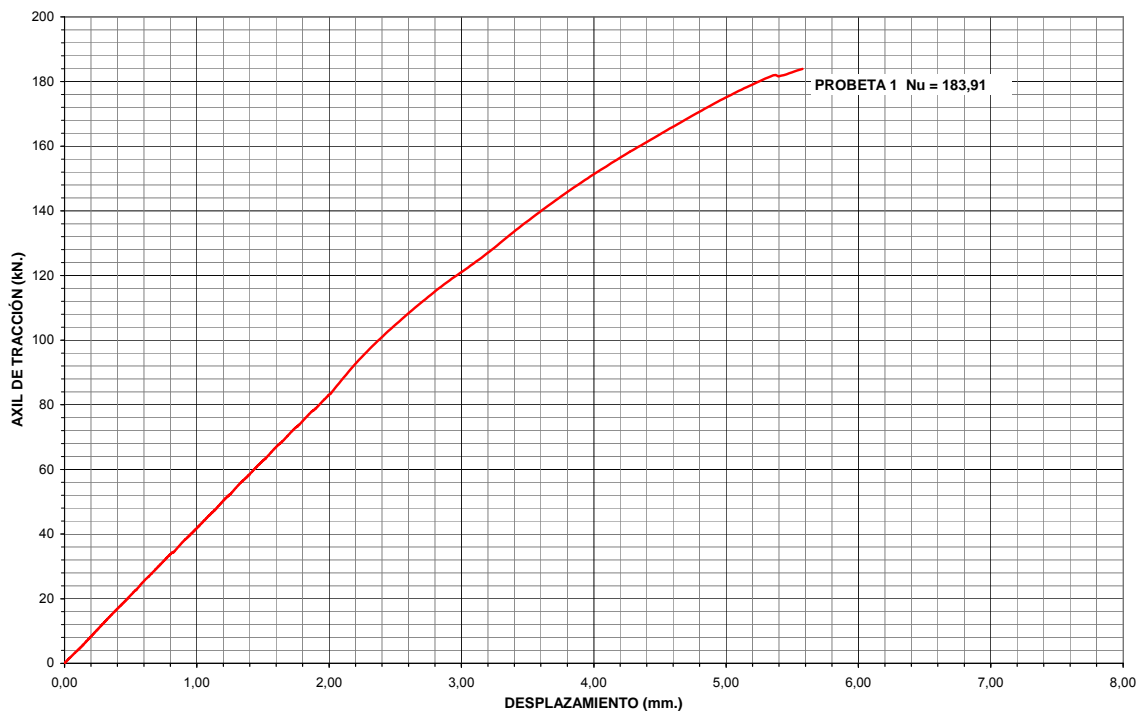
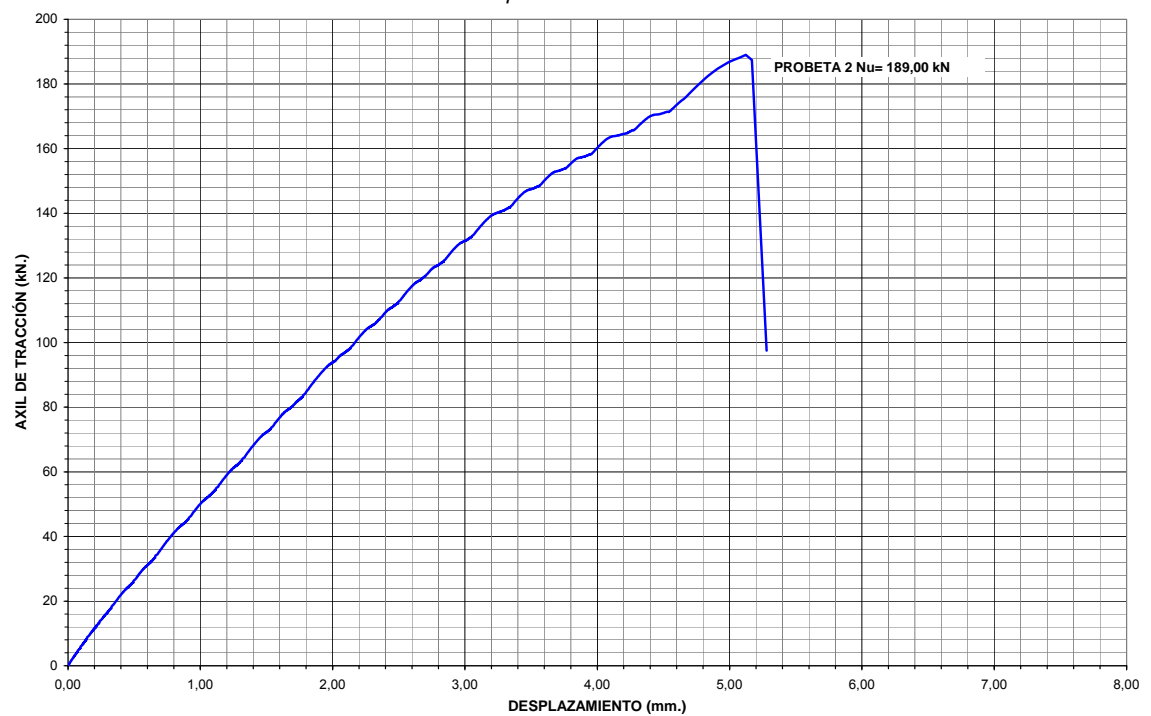
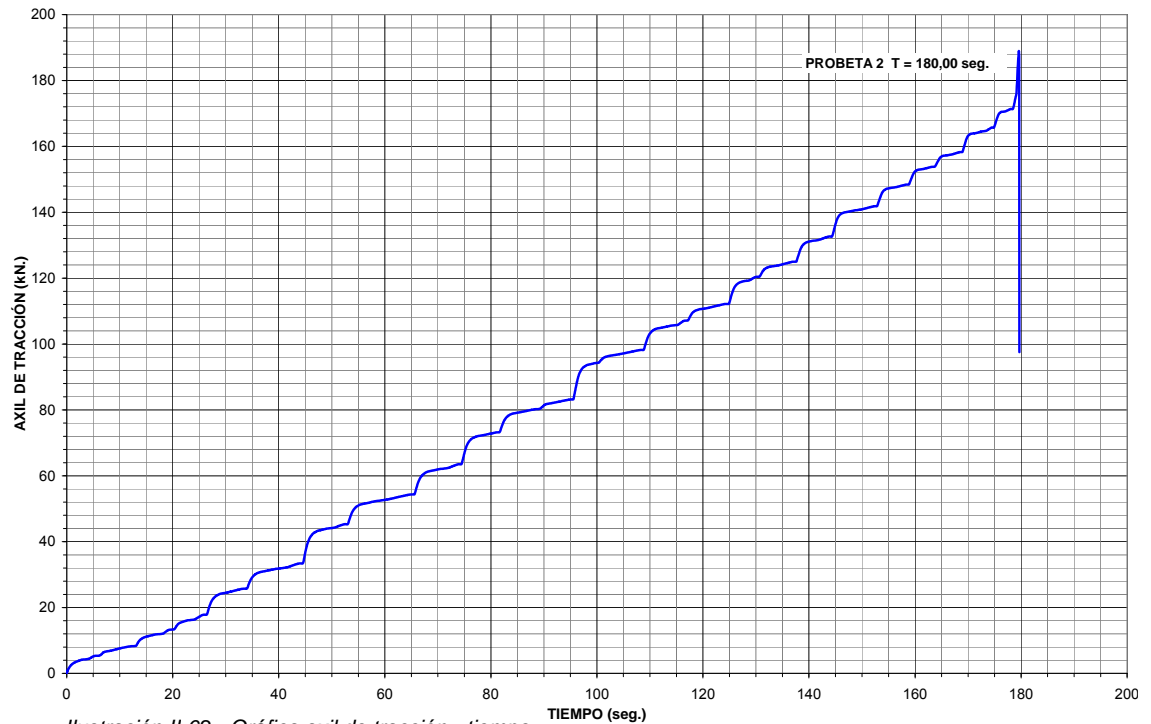


Ilustración II-60.- Gráfica axil de tracción - desplazamiento.

PROBETA 2t.



Ilustración II-61.- Probeta 2t. Ensayo de tracción



La rotura de la probeta 2 se produce con un axil de tracción de 189 kN en un tiempo de 180 seg. Se adecua el ensayo al límite normativo de 300 ± 120 seg. no obstante recibe en los últimos 0,5 seg. una axil de 13 kN. Se aprecia en las ilustraciones la excentricidad derivada del empotramiento de los extremos de barra, confirmándose la influencia del esfuerzo de flexión producido en la rotura de la probeta.

PROBETA 3t.

Las graficas que se acompañan son claramente indicativas de que la velocidad de carga en el ensayo de la tercera probeta ha resultado totalmente inadecuada, lo resultados no pueden ser representativos por cuanto la duración del ensayo ha sido de 3,92 seg. En estas circunstancias más que un progresivo proceso de carga se aplicó a la probeta una acción de tipo dinámico, fracturándose la probeta al alcanzar una carga aplicada de 160,82kN.

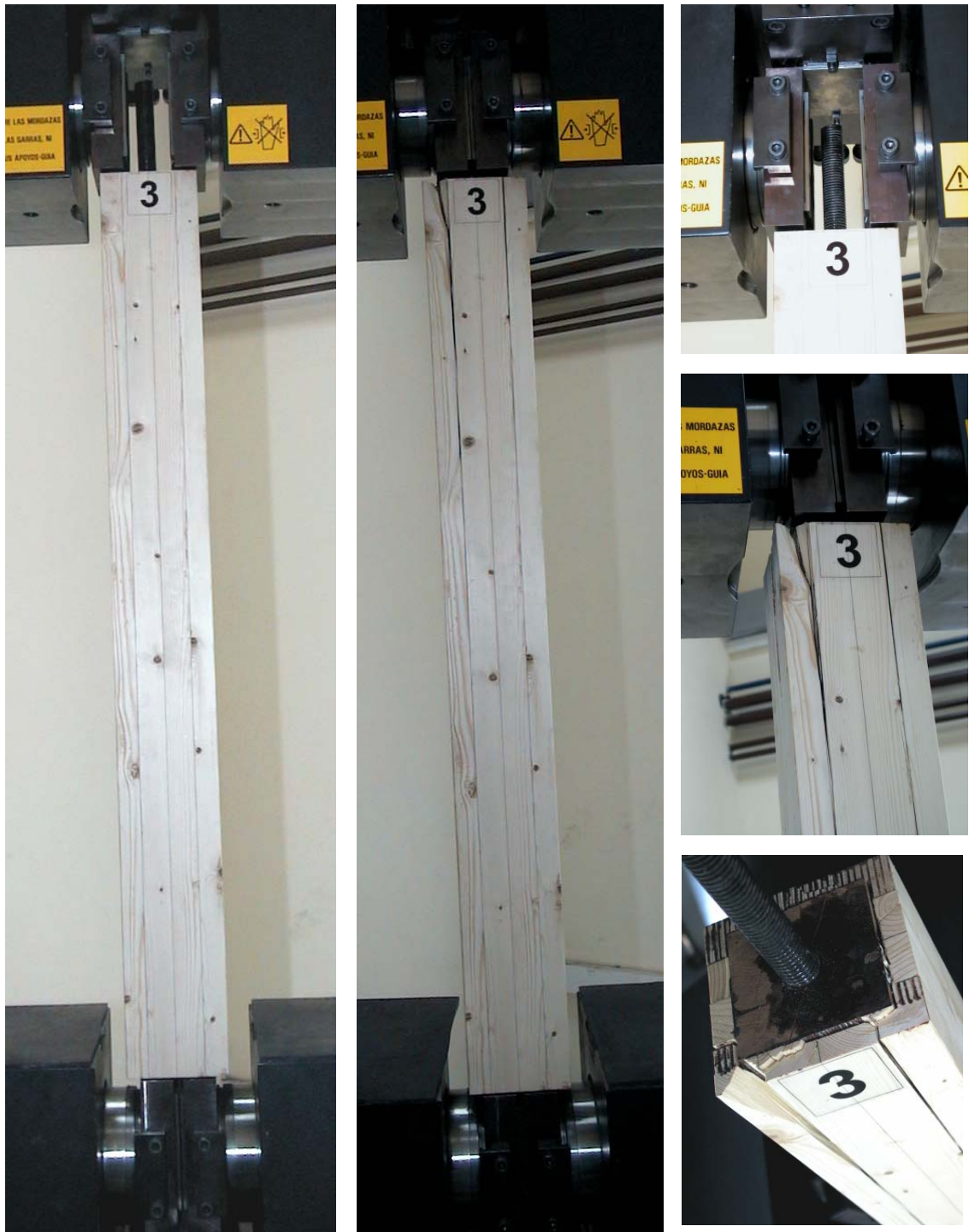


Ilustración II-64.- Probeta 3t. Ensayo de tracción

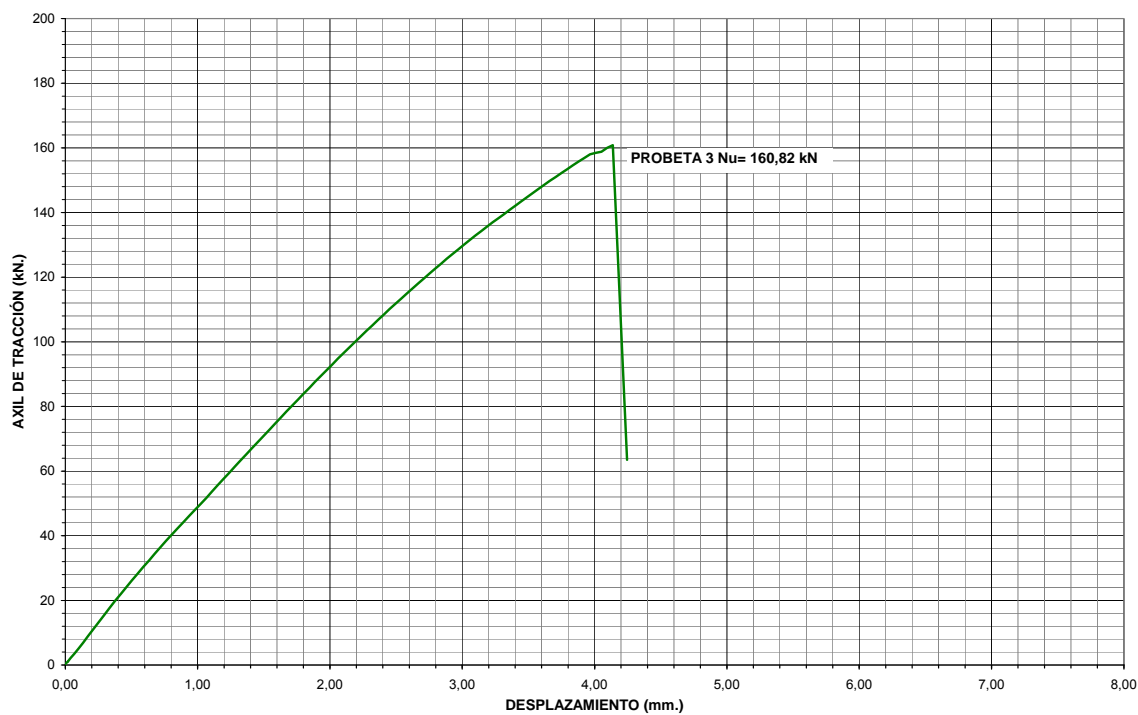


Ilustración II-65.- Probeta 3t. Gráfica axil de tracción - desplazamiento

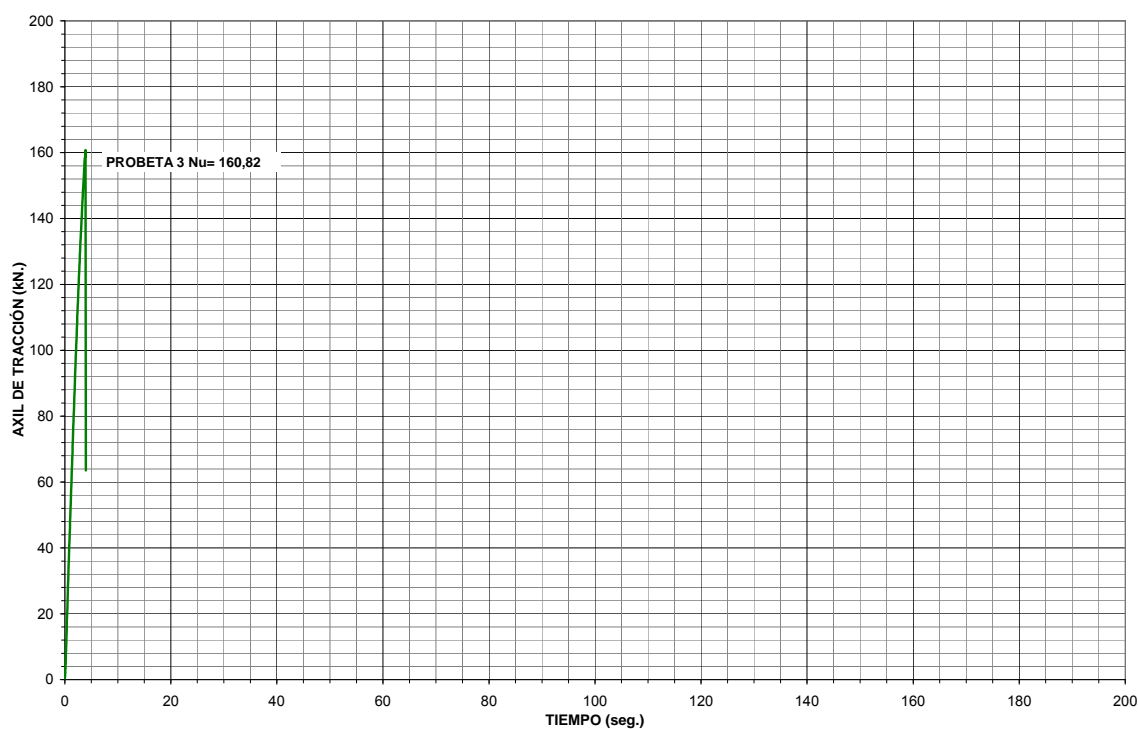


Ilustración II-66.- Probeta 3t. Gráfica axil de tracción - tiempo

PROBETA 4t.

La rotura de la probeta 4 se produce para una carga de 194,52 kN. y la duración del ensayo es de 82,04 seg. El incremento de carga en los últimos 5 seg. del ensayo ha sido de 129kN. lo que sin duda afecta a la carga de rotura de la probeta.



Ilustración II-67.- Probeta 4t. Ensayo de tracción

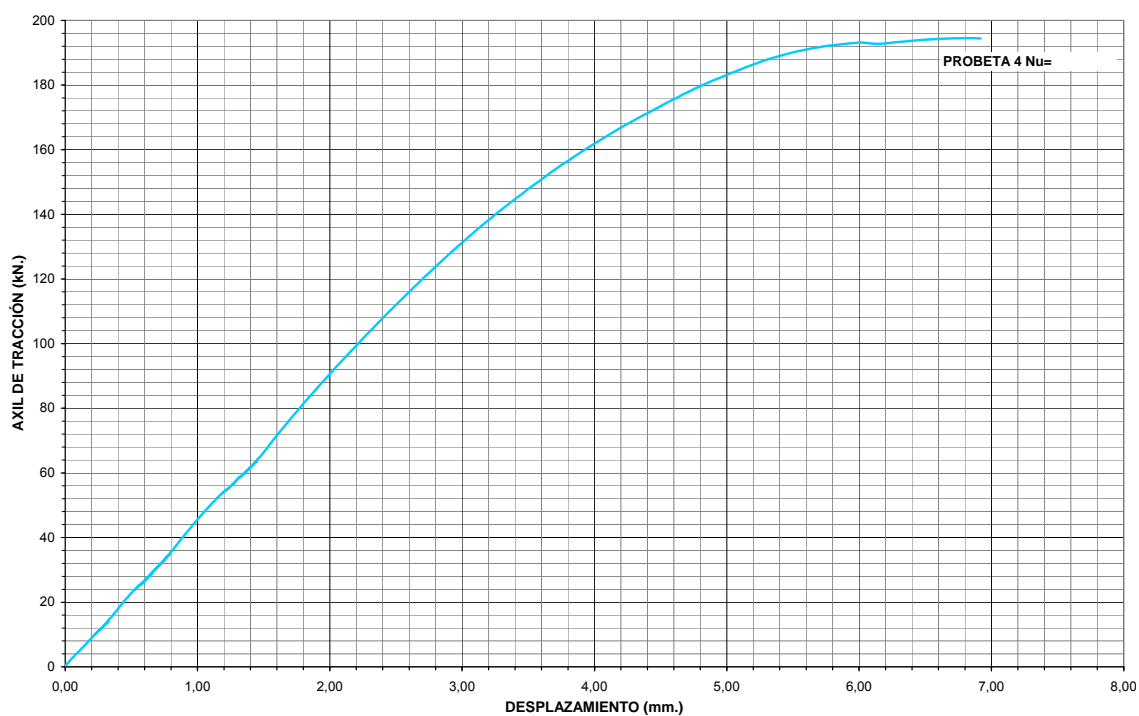


Ilustración II-68.- Probeta 4t. Gráfica axil de tracción - desplazamiento

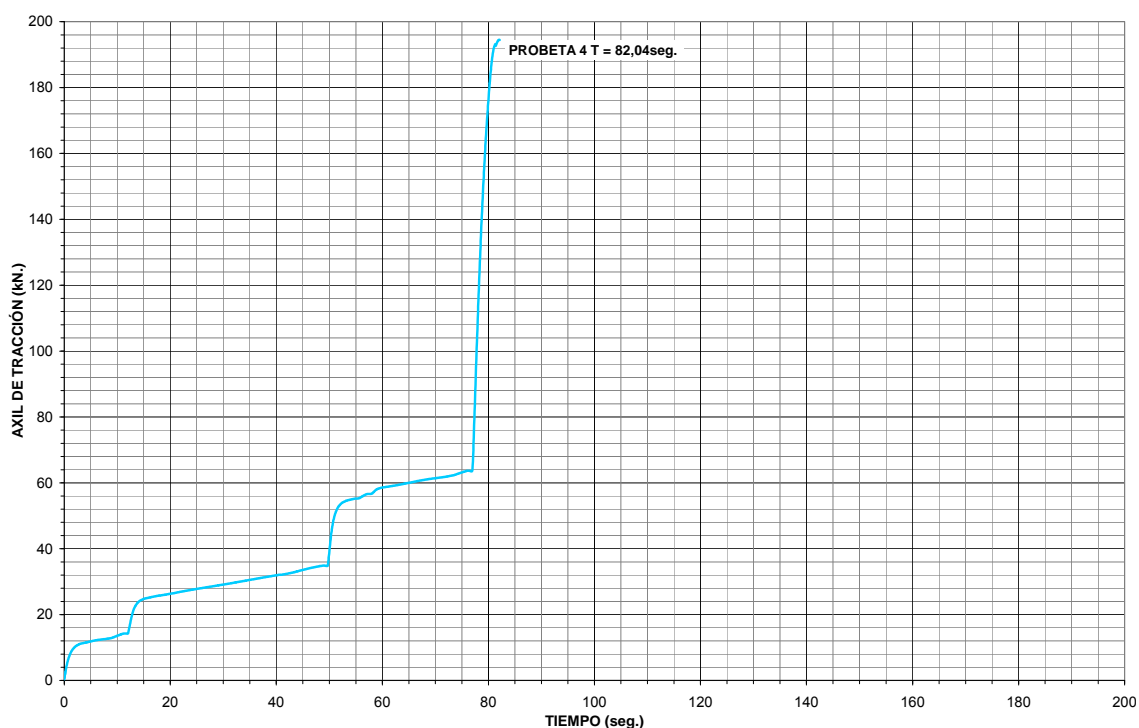


Ilustración II-69.- Probeta 4t. Gráfica axil de tracción - tiempo

De los resultados anteriores se deduce, que salvo en el caso de la probeta nº 3, los resultados son relativamente coincidentes. Calculando los valores característicos correspondientes a un nivel de confianza del 95%, el orden de magnitud alcanzado en los ensayos se muestra en la tabla y las ilustraciones de la página siguiente:

Ensayo de tracción. MEGASA	Probetas 1, 2 y 4	Probetas 1, 2, 3 y 4
Valor medio. N_m	198.14 kN	182.06 kN
Valor característico. N_k	182,03 kN	161,03 kN

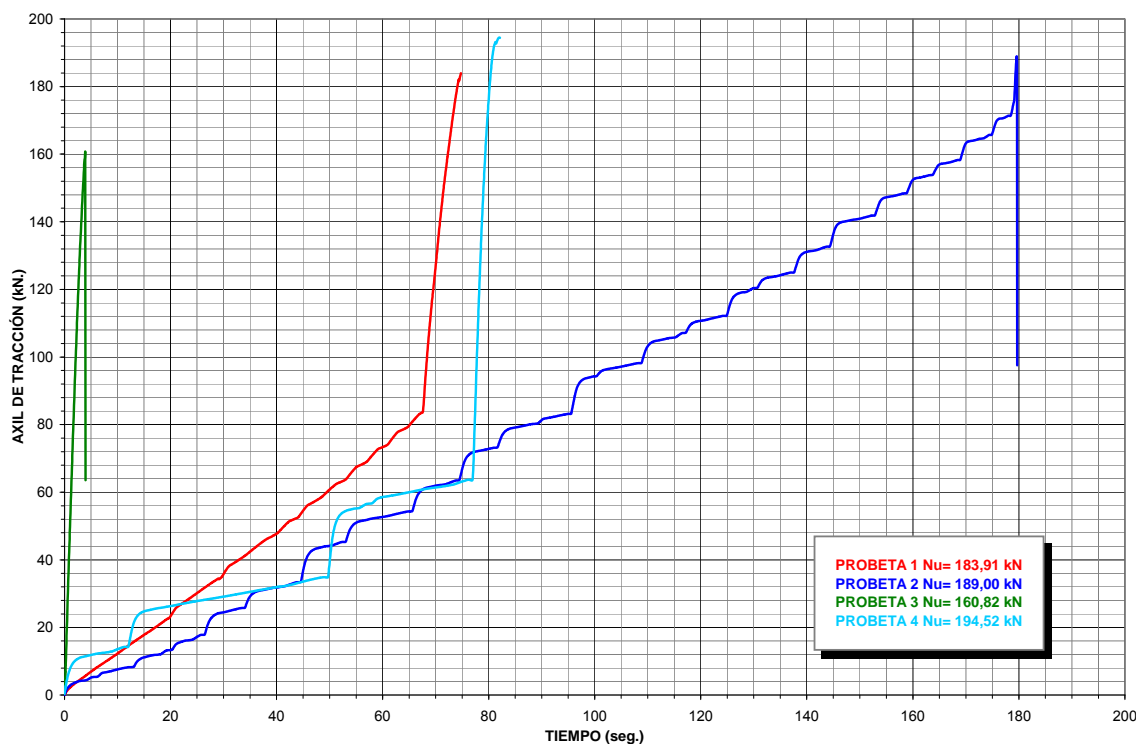


Ilustración II-70.- Gráfica comparativa axil de tracción - desplazamiento

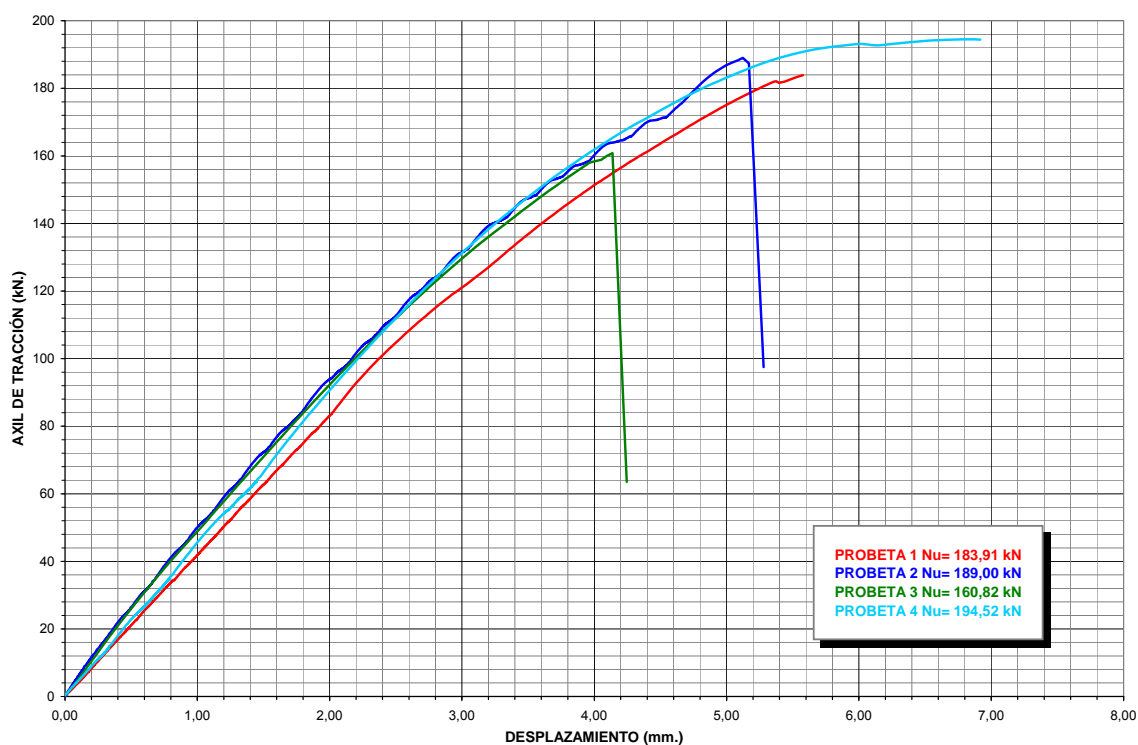


Ilustración II-71.- Gráfica comparativa axil de tracción - desplazamiento

Los ensayos realizados a la vista de los resultados obtenidos se pueden valorar como altamente satisfactorios, ya que se han alcanzado valores de agotamiento superiores al valo númerico de cálculo. En ningún caso estos valores pueden considerarse concluyentes habida cuenta de la población analizada y la imposibilidad de realizar un control adecuado de los parametros de tiempo y carga. Los ensayos realizados han de ser complementados con nuevas campañas que permitan ajustar el modelo de cálculo. Las nuevas campañas de ensayos tanto de compresión como de tracción se realizarán en el CENTRO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN EDIFICACIÓN E ENXEÑERÍA CIVIL (CITEEC), al disponer ya del equipamiento necesario para el correcto enlace de las probetas traccionadas.

ENSAYOS DE PROBETAS A COMPRESIÓN

PRIMERA CAMPAÑA DE ENSAYOS

Utilizando la prensa dinámica universal INSTROM modelo 8805 de 1000kN emplazada en el CITEEC, se lleva a cabo primera campaña de ensayos a compresión para determinar la capacidad resistente de las barras de madera hueca. Los ensayos se realizarán imponiendo un desplazamiento por unidad de tiempo, llevando el ensayo hasta la rotura de la probeta.

El ensayo debe simular las condiciones reales de trabajo de la pieza, por tanto la transmisión de la carga se realiza a través de una placa con una tuerca soldada al vástago metálico dispuesto en el nudo extremo de la barra. En esta primera campaña se ensayarán cuatro probetas con igual diseño de enlace extremo de barra.



*Ilustración II-72.- Prensa dinámica universal.
Detalle de transmisión de carga
al vástago metálico.*

Para interpretar adecuadamente los resultados de los ensayos, se determinan en primer lugar los resultados resistentes teóricos frente a la sollicitación axil.

- ❑ Axil característico a compresión paralela calculado en la sección hueca de la barra:

$$N_k = \left[b^2 - (b - 2 \cdot e)^2 \right] \cdot f_{c,0,k} = 286,20 \text{ kN}$$

- ❑ Axil característico a compresión paralela calculado en la sección correspondiente al enlace de extremo empleado en las probetas. Dicho axil se ha determinado teniendo en cuenta el área correspondiente a las zonas realmente encoladas y una excentricidad de carga de $e = b/20 = 6 \text{ mm}$.

$$N_k = 194,38 \text{ kN}$$

El axil obtenido se reduce a $N_k = 173,00 \text{ kN}$ si se considera una excentricidad $e = 10 \text{ mm}$. más próxima a la presente en las probetas.

PROBETA 1c.



Antes de la realización del ensayo se detecta una distorsión en la zona de contacto entre la probeta de madera y el plato inferior de la máquina de ensayos debida a las propias imperfecciones en la ejecución de la probeta.

Se opta, por la realización del ensayo en estas condiciones, modificando para posteriores ensayos las condiciones de apoyo.



Ilustración II-73.- Probeta 1c. Defecto de apoyo plato - madera por imperfección en la elaboración de la probeta

Los resultados del ensayo certifican que las deficientes condiciones de apoyo generaron una enorme excentricidad de carga, que condujo a la rotura de la probeta con unos valores muy bajos de carga. La rotura se produce tras 296,52 seg. con un desplazamiento impuesto de 2,90mm. y una carga aplicada de 132,64 kN.

Los cambios a realizar para ensayos posteriores se centran en la disposición en el apoyo inferior de un elemento que sea capaz de realizar un reparto uniforme de la carga a toda la sección de la barra y en lo que respecta al apoyo superior se diseña una chapa de acero de 11,50 cm. de lado y de sección trapezoidal, con una rigidez superior a la chapa de sección rectangular utilizada en este ensayo.



Ilustración II-74.- Probeta 1c. Ensayo de compresión. Obsérvese el giro de la placa de reparto debido a la excentricidad de carga que provoca el mal condicionamiento del apoyo.

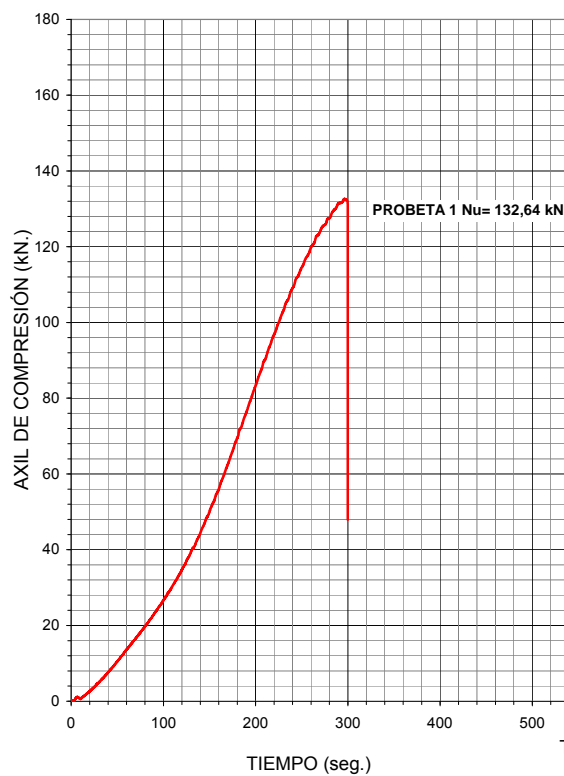
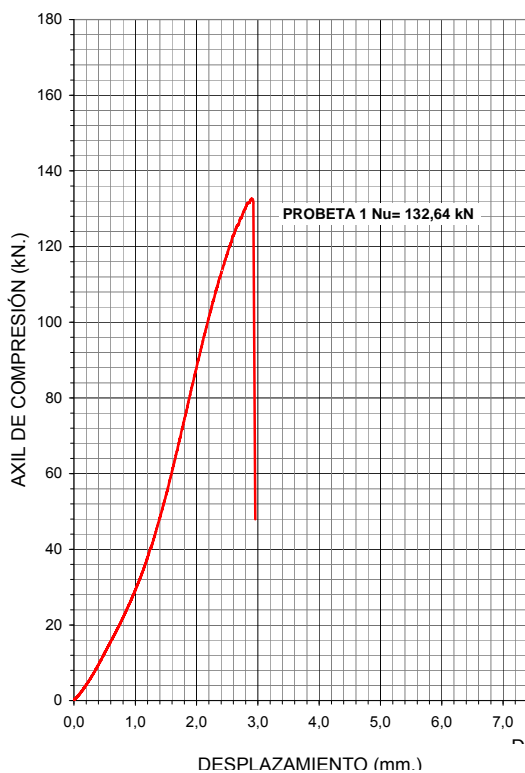


Ilustración II-75.- Probeta 1c. Gráficas axil de compresión – desplazamiento / tiempo

PROBETA 2c.

Se ensaya la probeta 2 colocando en su base una pieza de pino rojo de dimensiones 13x13x3cm. La pieza se coloca con sus fibras perpendiculares a la sollicitación, de forma que su aplastamiento sea muy superior al de la probeta a ensayar y permita absorber los defectos de ejecución. Si bien ello fue así, dicha solución no resultó adecuada pues el proceso de carga se alargó excesivamente, las deformaciones fueron falseadas e hizo realmente difícil alcanzar un punto claro de rotura de la probeta.



Ilustración II-76.- Probeta 2c. Ensayo de Compresión. Obsérvese el defectuoso encolado entre maderas

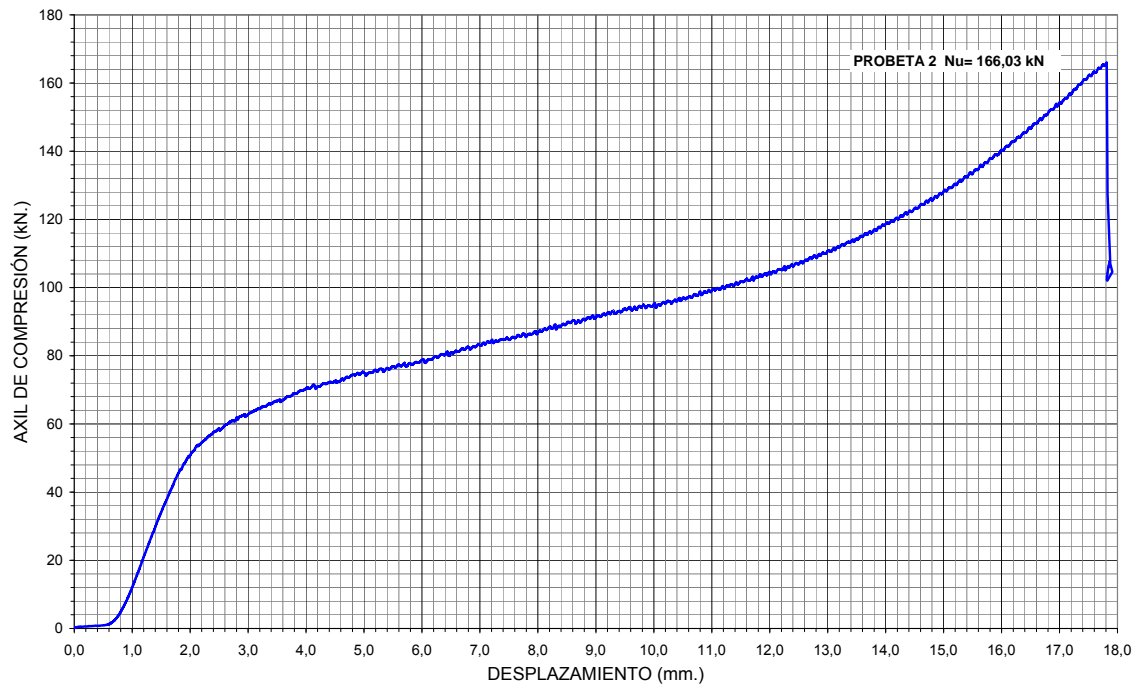


Ilustración II-77.- Probeta 2c. Gráfica axil de compresión – desplazamiento.

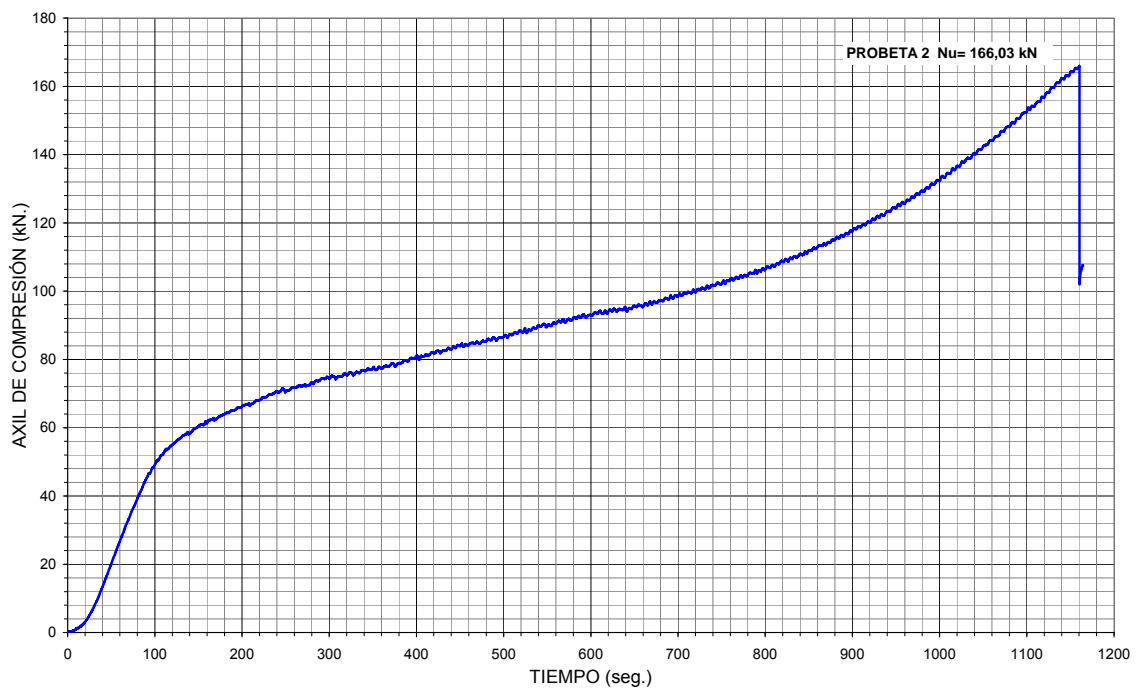


Ilustración II-78.- Probeta 2c. Gráfica axil de compresión - tiempo

Con el fin de evitar los problemas derivados del excesivo aplastamiento de la pieza de apoyo se dispondrán en los ensayos restantes dos láminas de neopreno; una en la base de apoyo de la probeta y otra entre el extremo de la barra y la chapa de reparto superior.

PROBETA 3c

Los resultados obtenidos son claramente más realistas y constituyen la solución adecuada. Se comprobó en los ensayos que la placa de reparto utilizada resulta insuficiente para transmitir la carga del vástago a la madera, lo que redujo la capacidad de carga del enlace de extremo empleado. Será necesario por tanto el diseño de una nueva placa de reparto antes de la realización de la segunda campaña de ensayos.

La rotura de la probeta 3c produce con un desplazamiento de 5,19mm. con un axil carga aplicada de 176,11kN en un intervalo de 335,78 seg.



Ilustración II-79.- Probeta 3c. Ensayo de compresión.

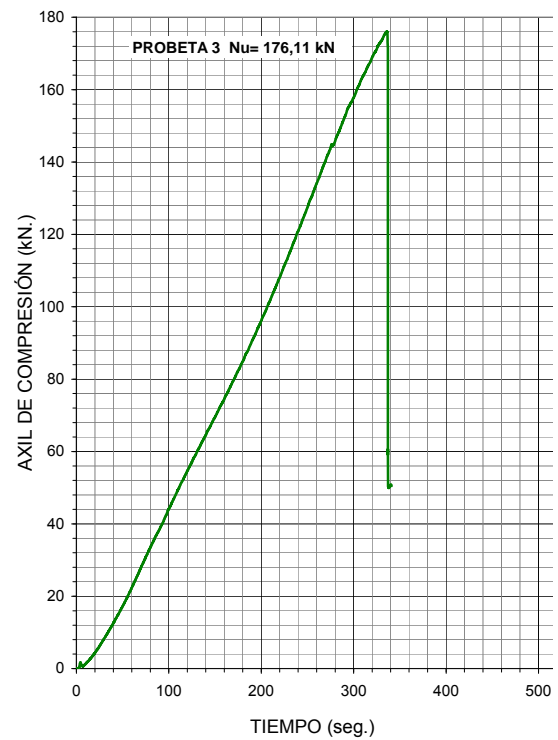
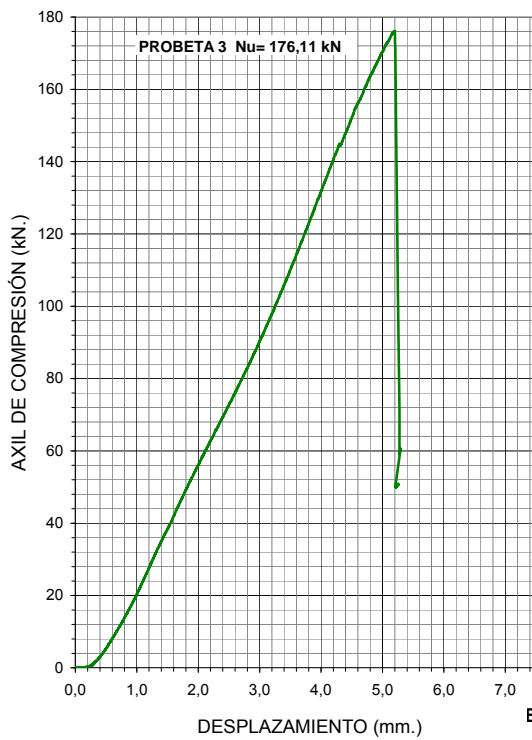


Ilustración II-80.- Probeta 3c. Gráfica axil de compresión – desplazamiento / tiempo

PROBETA 4



Ilustración II-81.- Probeta 4c. Ensayo de compresión.

Se realiza el ensayo de la probeta 4 con idénticos parámetros de carga que los ensayos anteriores, los resultados muestran una clara homogeneidad de resultados, que avalan el diseño del nudo extremo de la barra. La rotura se produce con un desplazamiento impuesto de 4,84mm. y una carga aplicada de 171,66 kN.

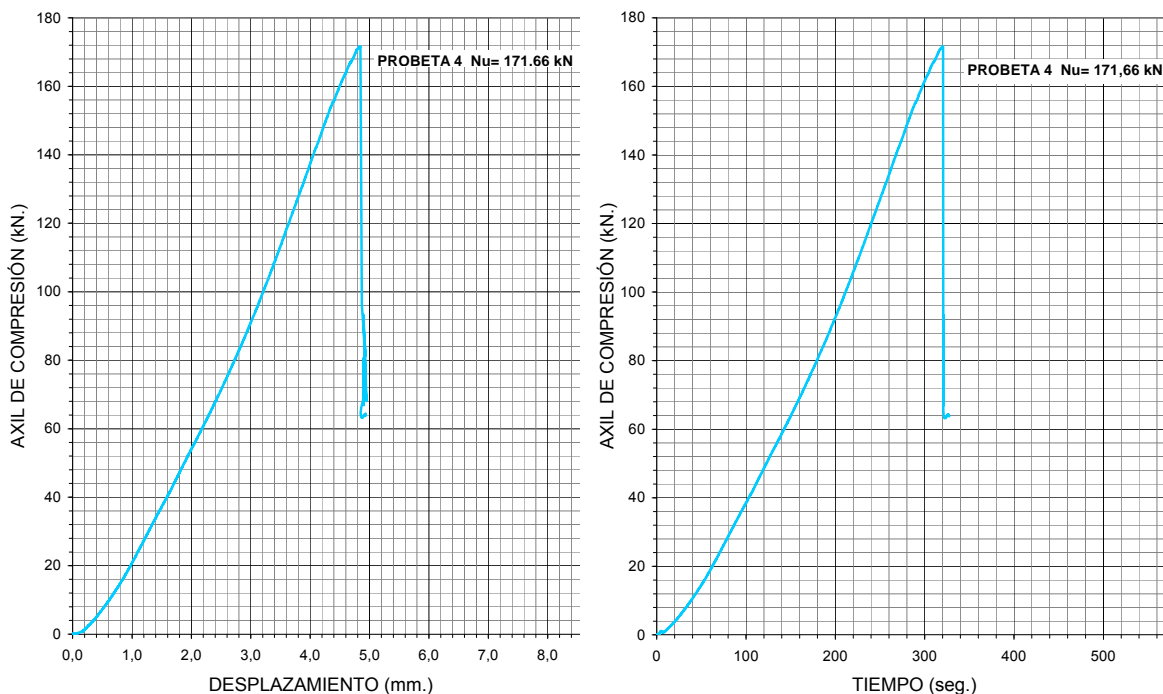


Ilustración II-82.- Probeta 4c. Gráfica axil de compresión – desplazamiento / tiempo

Ensayo de compresión. CITEEC Primera Campaña	Probeta 1C	Probeta 2C	Probeta 3C	Probeta 4C
Condiciones de Apoyo	Placa sin refrentar	Madera	Neopreno	Neopreno
Duración del ensayo	296,52	1.160,34	335,78	320,11
Desplazamiento	2,90	17,82	5,19	4,84
Carga hasta la rotura	132,64	166,03	176,11	171,66

Admitiendo una distribución gaussiana, se obtienen los valores característicos correspondientes a un nivel de confianza del 95%, con el único objetivo de mostrar el orden de magnitud, dada la población analizada.

1ª Campaña de ensayos Ensayo de compresión. CITEEC	Probetas 2, 3 y 4	Probetas 1, 2, 3 y 4
Valor medio. N_m	171,27 kN	161,61 kN
Valor característico. N_k	164,51 kN	133,56 kN

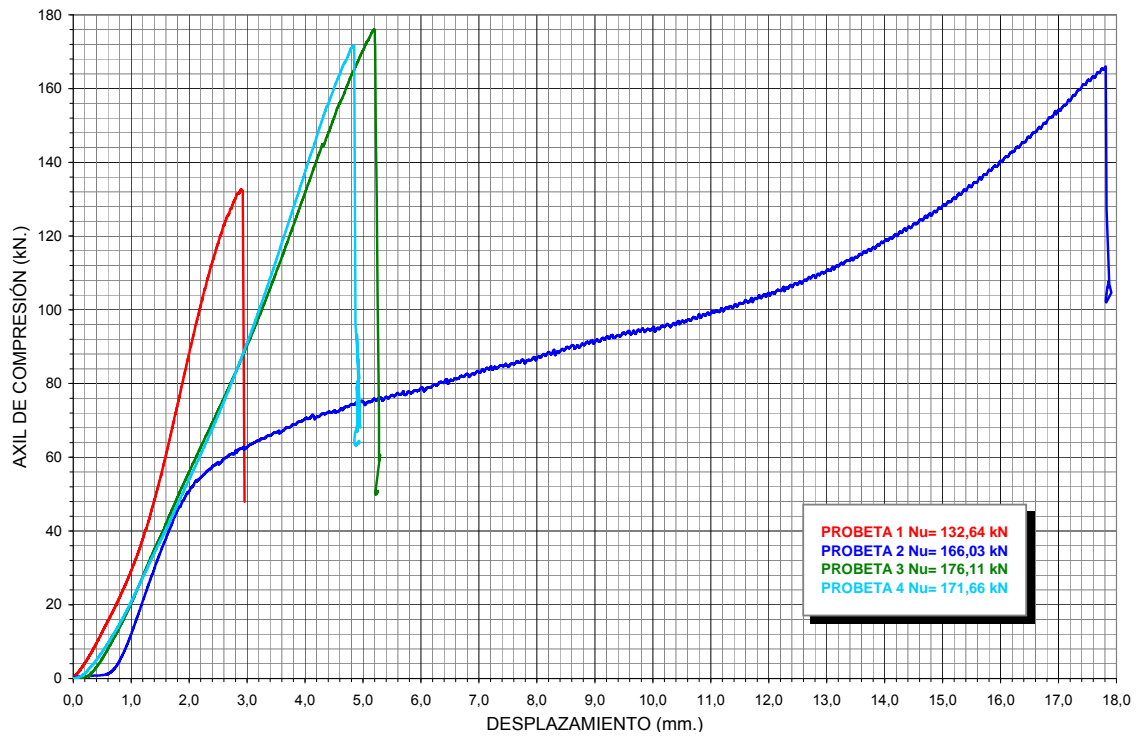


Ilustración II-83.- Gráfica comparativa axil de tracción - desplazamiento

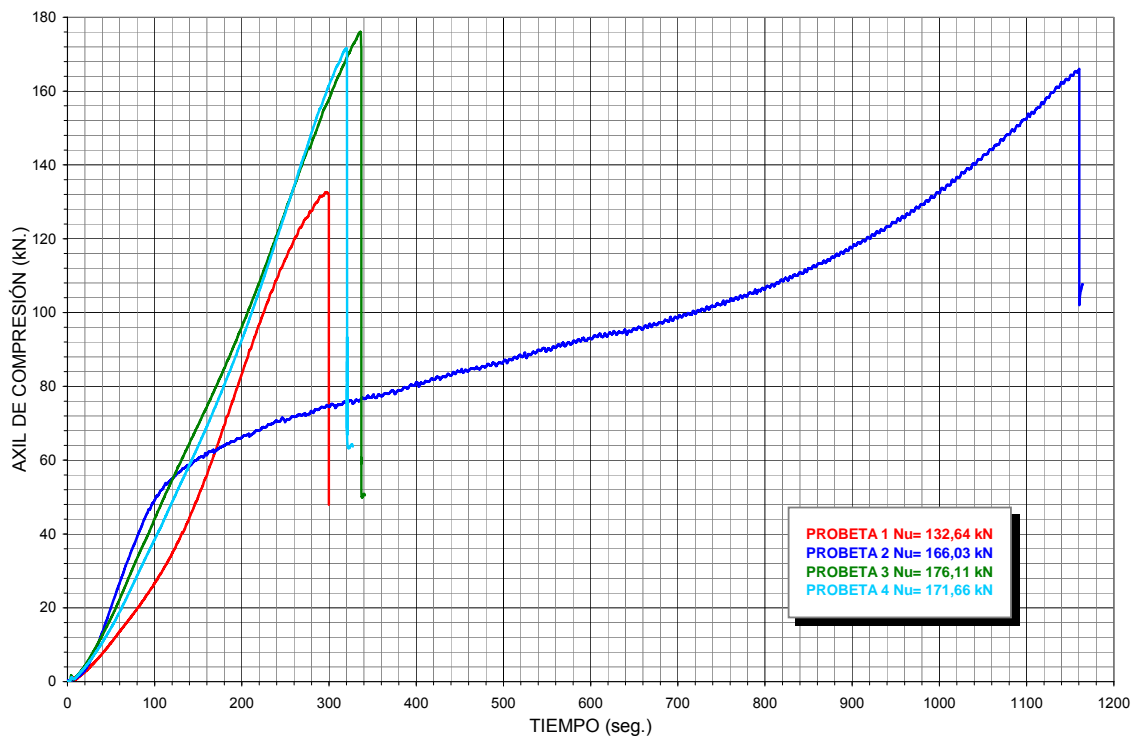


Ilustración II-84.- Gráfica comparativa axil de tracción - tiempo

Una vez analizados los resultados obtenidos, se decide proceder a la realización de una nueva campaña de ensayos con un control mayor del proceso de encolado, se diseña una nueva placa metálica de mayores dimensiones y superior rigidez al objeto de asegurar una idónea transmisión de carga desde el vástago metálico a toda la sección de madera del extremo de barra. Señalar no obstante, que a pesar de que los resultados obtenidos en el ensayo de compresión ha sido inferiores a los de tracción, realmente son estos últimos los importantes para juzgar la bonanza del enlace extremo de barra, por cuanto la simple disposición de la nueva placa de reparto mejorará sin duda la respuesta del enlace ante esfuerzos de tracción.

ENSAYOS DE PROBETAS A TRACCIÓN

SEGUNDA CAMPAÑA DE ENSAYOS

Con las experiencias recogidas en los ensayos realizados se aborda una segunda campaña de ensayos tanto de tracción como de compresión, en la que se analizarán diferentes soluciones de enlace extremo de barra. Esta nueva campaña de ensayos se realiza íntegramente en el CITEEC. Para la realización del ensayo de tracción y ante la tardanza de las mordazas que permitirán la sollicitación axial de tracción a la prensa dinámica universal INSTRON, se diseñaron una serie de piezas auxiliares que adaptadas al pórtico metálico y a la losa de carga disponibles en el laboratorio de construcción, permitieron la realización de los ensayos de tracción.

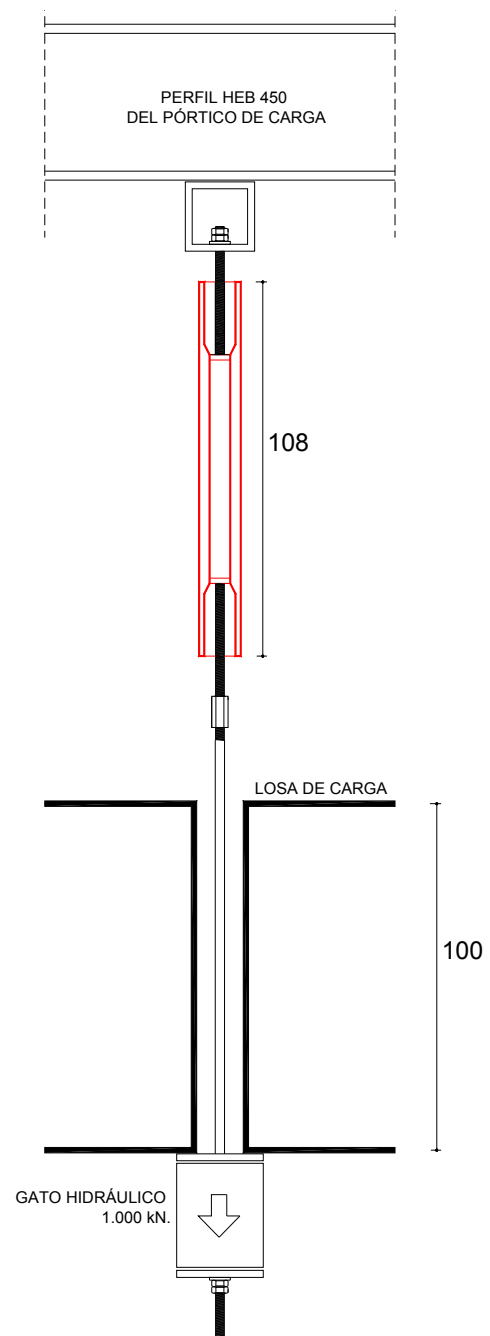


Ilustración II-85.- Esquema de ensayo de tracción. CITEEC.

Se construyeron un total de seis probetas con tres diseños diferentes de enlace extremo de barra. En las probetas nº 11 y 12 se utilizó idéntica solución a la ensayada en la anterior campaña de ensayos, modificando únicamente el tipo de resina utilizada para el enlace del vástago metálico con la madera que pasó a ser del tipo HILTI HIT HY-150 en lugar de la utilizada anteriormente SIKADUR 53 Inyección.

En las probetas nº 13 y 14 se empleó un taco central de madera frondosa de menor dimensión transversal y mayor longitud (60x60x300mm.) sin realizar los rebajes en las paredes laterales de la barra hueca. En la dos últimas probetas nº 15 y 16 se empleó igual solución que la anterior pero con el taco central de madera de abeto en lugar de frondosa.

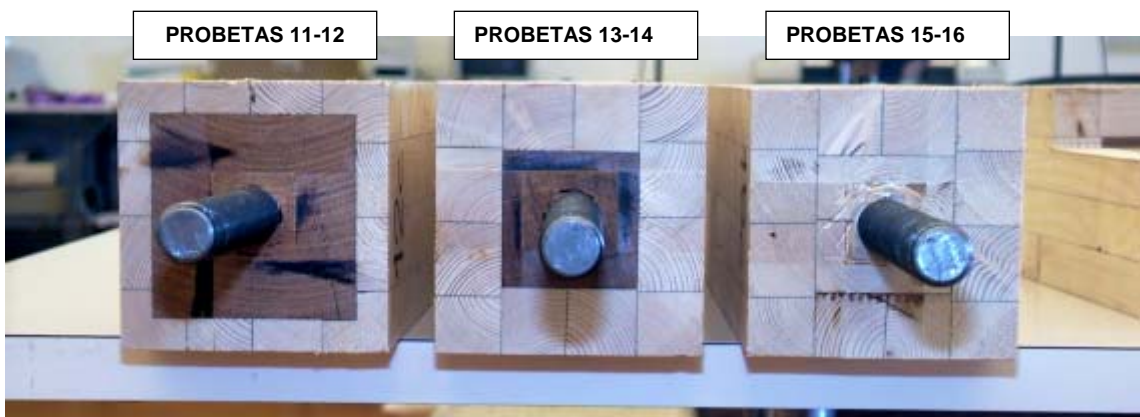


Ilustración II-86.- Tres diferentes diseños de enlace extremo de barra.



Con la finalidad de controlar la velocidad de carga a utilizar a lo largo de los ensayos y ante la imposibilidad de control de desplazamientos del sistema hidráulico utilizado, se dispone un transductor de la casa APEK modelo HLS50B. Como más adelante se podrá comprobar su comportamiento no resultó adecuado ya que modifica de forma muy variable el software de control. Para la siguiente probeta se estableció una velocidad de carga de 0,30kN/seg. incrementándose para las restantes ensayos a 0,40kN/seg. con el criterio de ajustar la duración de los ensayos a los estándares normativos.

Ilustración II-87.- Instrumental de control del ensayo.

PROBETA 11



Ilustración II-88.- Probeta 11. Ensayo de tracción. Transductor colocado para control de carga por desplazamiento

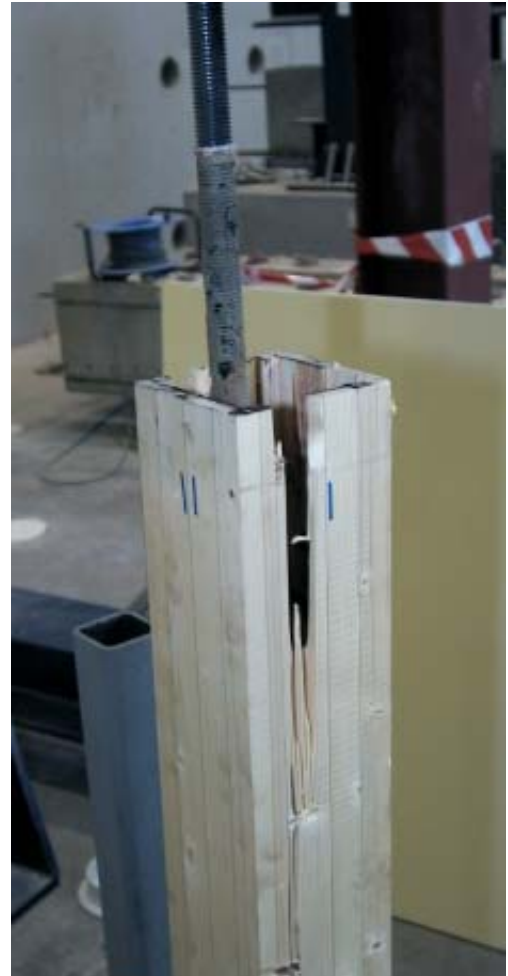


Ilustración II-89.- Rotura de la probeta 11.

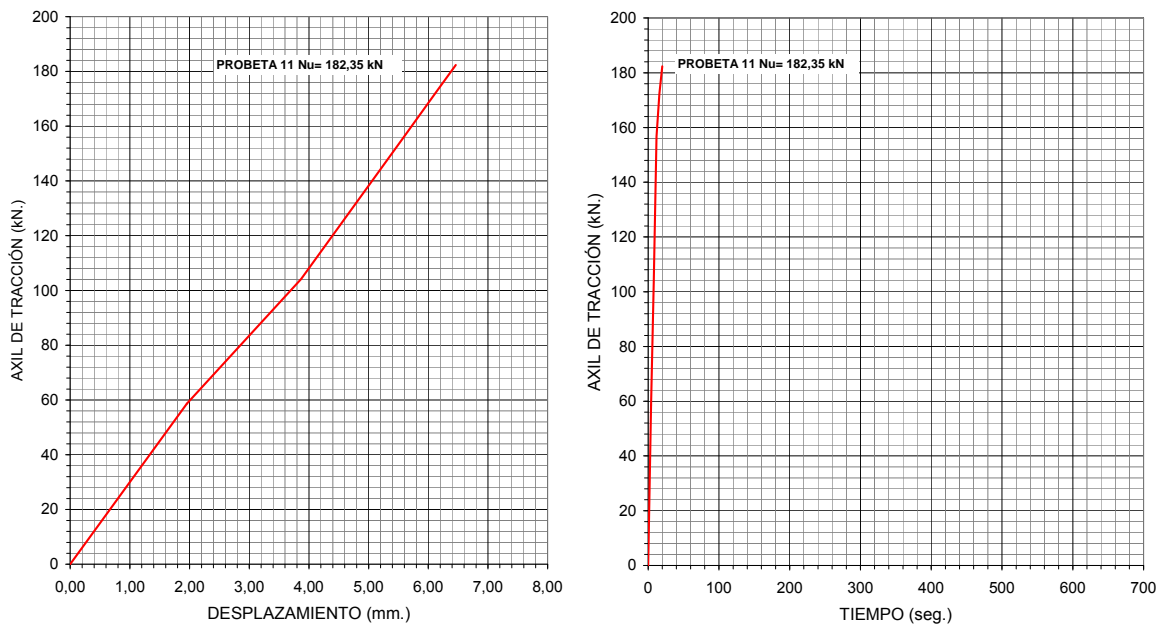


Ilustración II-90.- Probeta 11.-Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo

El mal funcionamiento del transductor, determinó una duración del ensayo de 20seg. con una carga de rotura de 182,35kN y un desplazamiento de 6,46mm. Como se ha comentado arriba se opta en los siguientes ensayos por la realización de un control de carga transmitida por unidad de tiempo, utilizando el transductor exclusivamente como herramienta de captura de datos de los desplazamientos de la probeta durante el proceso de carga.

PROBETA 12

Con una velocidad de carga de 0,30 kN/seg. la duración del ensayo ha sido de 625 seg. con un desplazamiento de 6,16 mm. y una carga de rotura de 186,27 kN. Para ensayos posteriores se ajusta la velocidad de carga hasta 0,40 kN/seg. ajustando así la duración del ensayo a valores en torno a 300 ± 120 seg.

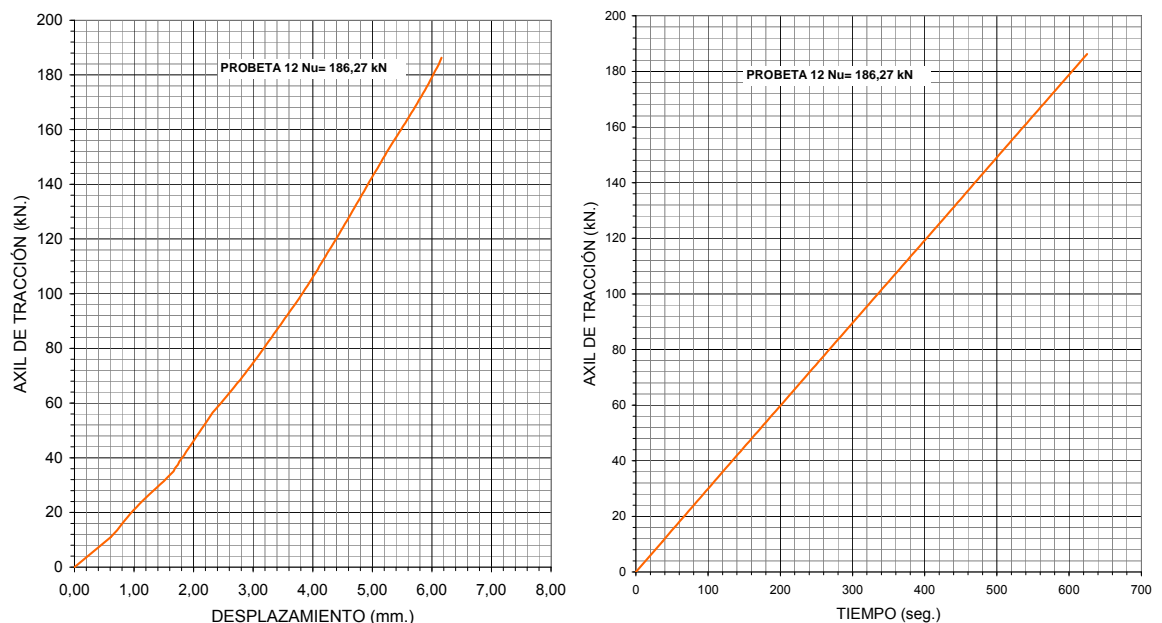


Ilustración II-91.- Probeta 12t.- Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo



Ilustración II-92- Probeta 12t. Ensayo de tracción. Obsérvese el deficiente encolado del taco central.

PROBETA 13



Ilustración II-93.- Probeta 13t. Ensayo de tracción. Nuevamente se aprecian zonas sin cola en la zona de contacto

Se establece una velocidad de carga de 0,40 kN/seg la duración del ensayo es de 398 seg. con un desplazamiento de 6,53mm. y una carga de rotura de 157,63 kN. Se observa en las ilustraciones precedentes que existen problemas derivados del incorrecto proceso de ejecución de los enlaces al no ser capaz de asegurar un correcto encolado entre maderas.

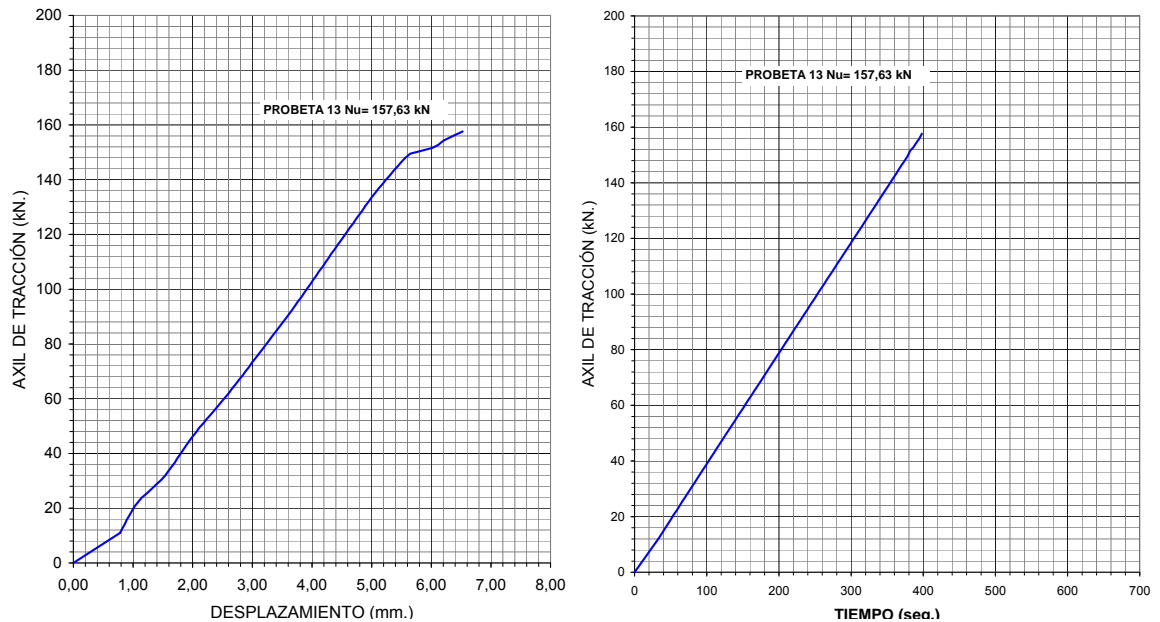


Ilustración II-94.- Probeta 13t.- Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo

PROBETA 14



Ilustración II-95.- Probeta 14t. Ensayo de tracción. Obsérvese el deficiente encolado entre maderas.

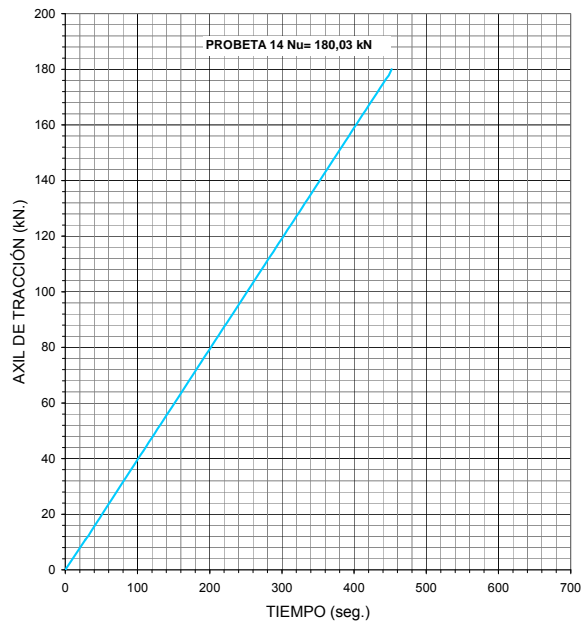
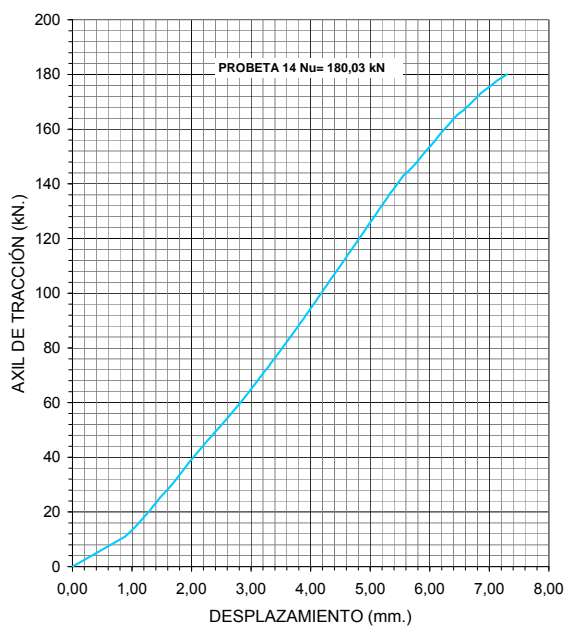


Ilustración II-96.- Probeta 14t.-Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo

PROBETA 15



Ilustración II-97.- Probeta 15t. Ensayo de tracción.

La duración del ensayo es de 321 seg. con un desplazamiento de 6,30mm. y una carga de rotura de 125,63 kN. Como era previsible se observa en la fotografías el deslizamiento del vástago derivado de la baja resistencia del taco central.



Ilustración II-98.- Probeta 15t. Ensayo de tracción.

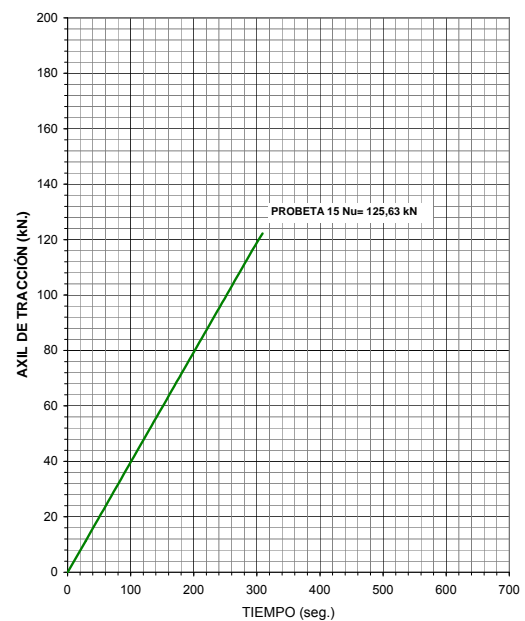
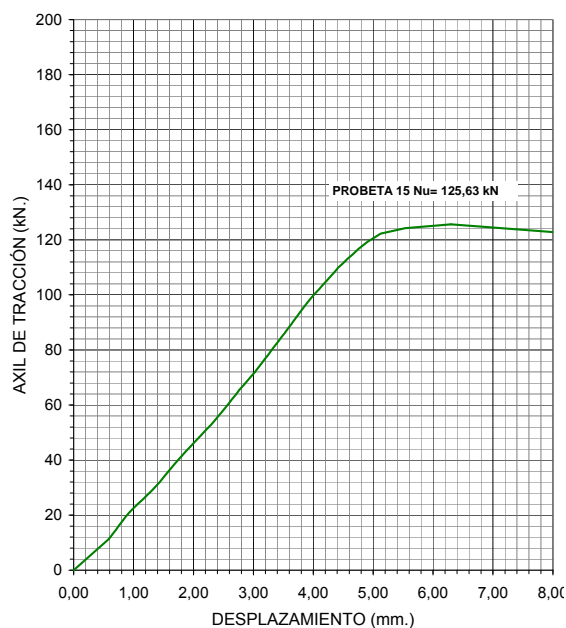


Ilustración II-99.- Probeta 15t.-Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo

PROBETA 16



Ilustración II-100.- Probeta 16t. Ensayo de tracción. Detalle de aplastamiento del taco central.

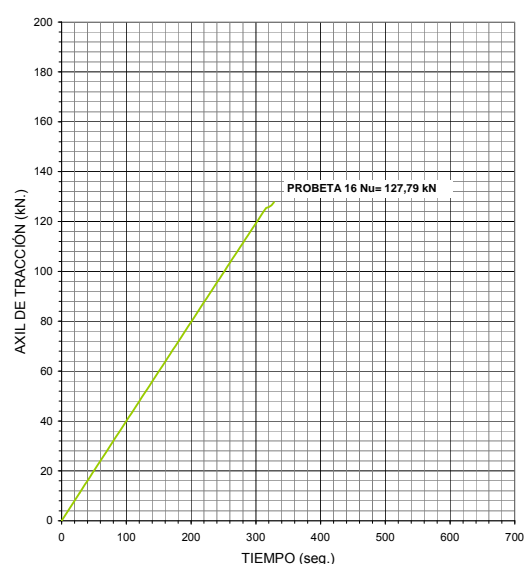
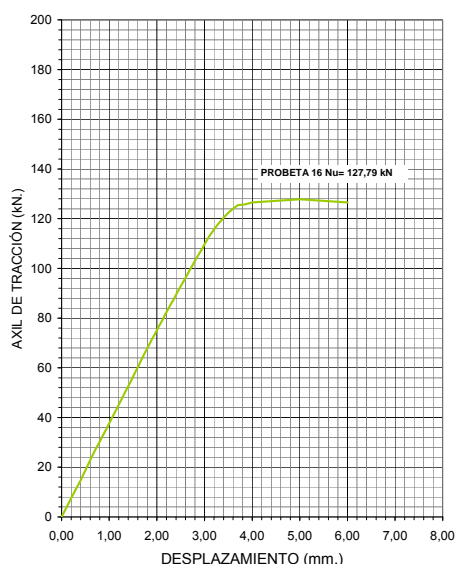


Ilustración II-101.- Probeta 16t.-Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo

TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN. CITEEC. SEGUNDA CAMPAÑA DE ENSAYOS				
Probeta nº	Información	Duración (seg.)	Desplaz. (mm.)	Carga (kN)
Probeta 11	Paredes rebajadas Taco macizo de frondosa (elondo)	20	6,46	182,35
Probeta 12	Paredes rebajadas Taco macizo de frondosa (elondo)	625	6,16	186,27
Probeta 13	Paredes de espesor constante Taco macizo de frondosa (elondo)	398	6,53	157,63
Probeta 14	Paredes de espesor constante Taco macizo de frondosa (elondo)	452	7,30	180,03
Probeta 15	Paredes de espesor constante Taco macizo de conífera	321	6,30	125,63
Probeta 16	Paredes de espesor constante Taco macizo de conífera	328	5,01	127,79

El diseño del nudo extremo de espesor constante utilizado en la probetas nº 13 y 14, aún disponiendo de una menor sección transversal se muestra como la mejor opción debido a su sencilla ejecución compensando la pérdida de superficie de contacto entre maderas con una mayor dimensión longitudinal. Los ensayos con claramente coincidentes, salvo en el caso de la probeta nº 13 que tal y como se puede apreciar en las fotografías, la rotura se vio condicionada por el deslizamiento del macizo central por defecto de encolado, problema de fácil solución cepillando conjuntamente el taco central y las dos caras laterales inmediatamente antes del encolado de las caras que cierran el tubo hueco.

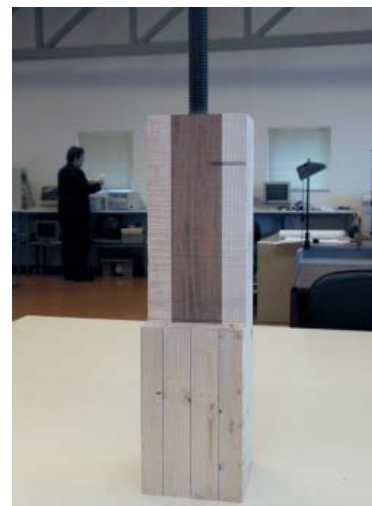


Ilustración II-102.-
Gráfica comparativa
axil de tracción – desplazamiento

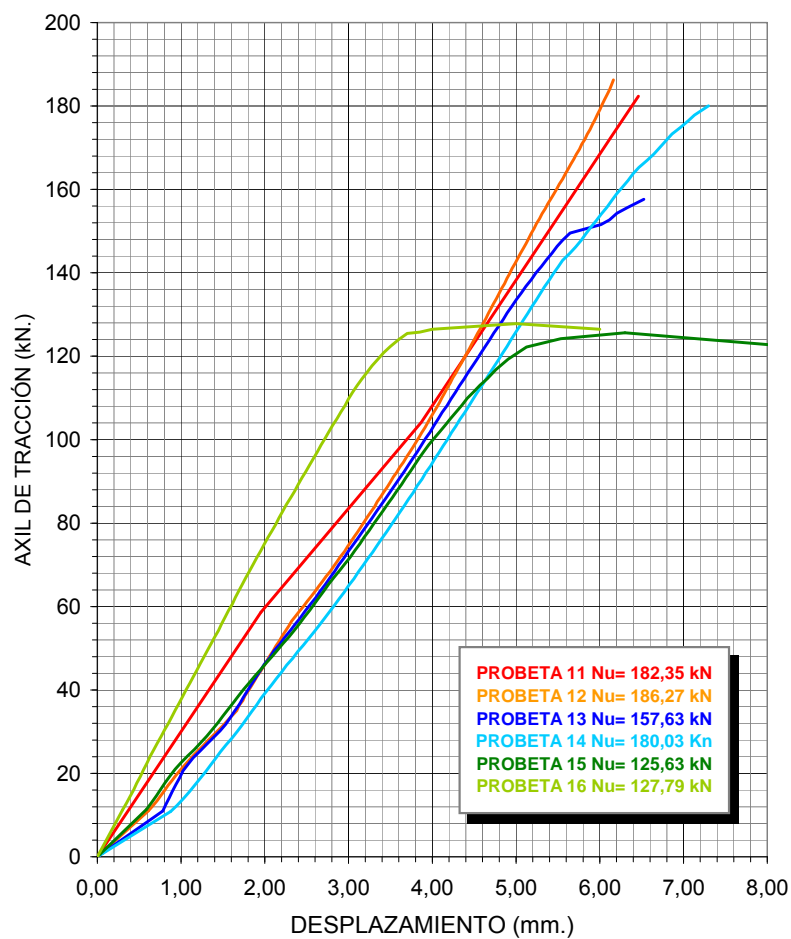
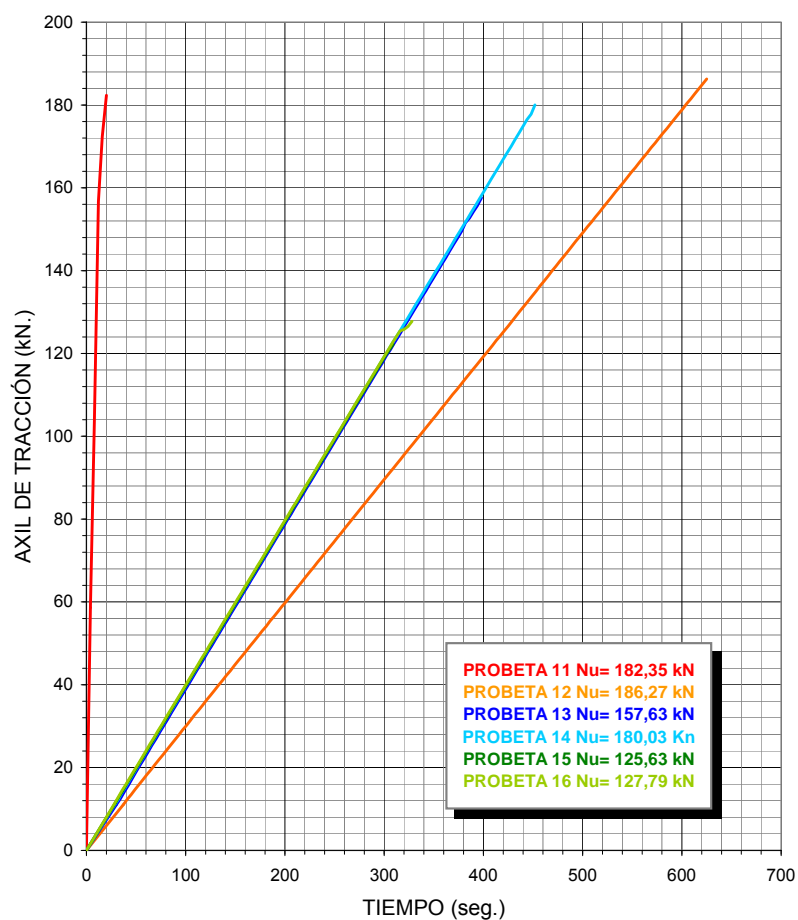


Ilustración II-103.-
Gráfica comparativa
axil de tracción – tiempo



ENSAYOS DE PROBETAS A COMPRESIÓN

SEGUNDA CAMPAÑA DE ENSAYOS

Aprovechando los extremos menos dañados de las probetas empleadas en los anteriores ensayos de tracción se procedió a realizar una segunda campaña de ensayos a compresión. Se utilizaron entonces seis probetas reutilizadas de las cuales las denominadas 2c, 3c y 4c corresponden a las que habían sido ensayadas en MEGASA, las restantes corresponden a los ensayos realizados en el CITEEC denominadas 12c, 14c y 15c. Las cuatro primeras 2c, 3c, 4c y 12c tienen el enlace extremo de barra realizado con un taco central de frondosa y con el espesor rebajado; la probeta 14c se compone de un taco central de frondosa con paredes laterales de espesor constante y por último la probeta 15c se construye con un taco central ejecutado con la misma madera que las paredes laterales de la barra.



Ilustración II-104.- Segunda campaña de ensayos de compresión. CITEEC

En cuanto a la resina empleada en la unión del vástago metálico en las tres primeras se utilizó SIKADUR 52 Inyección y en las tres restantes HILTI HIT HY-150.

La velocidad de carga para toda la campaña de ensayos se estableció por recorrido siendo de 0,015mm./seg. en la probeta 2c y 0,02 mm./seg. en las restantes.

PROBETA 2c



Ilustración II-105.- Probeta 2c. Ensayo de compresión

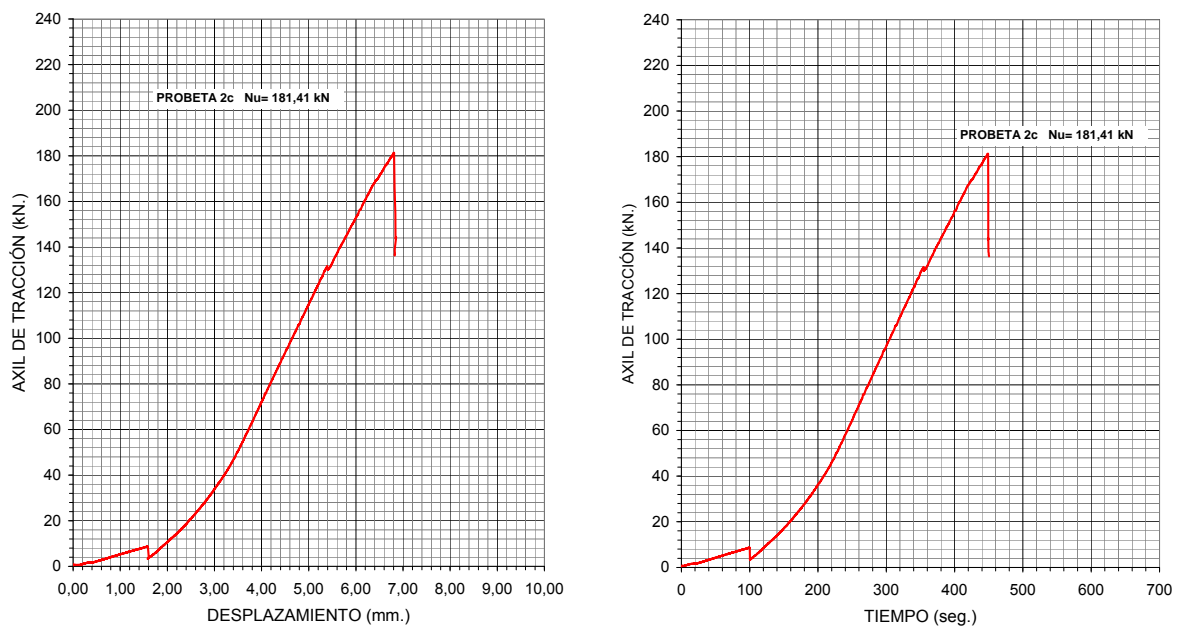


Ilustración II-106.- Probeta 2c.-Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo

PROBETA 3c



Ilustración II-107.- Probeta 3c. Ensayo de compresión.



Ilustración II-108.- Probeta 3c. Ensayo de compresión.

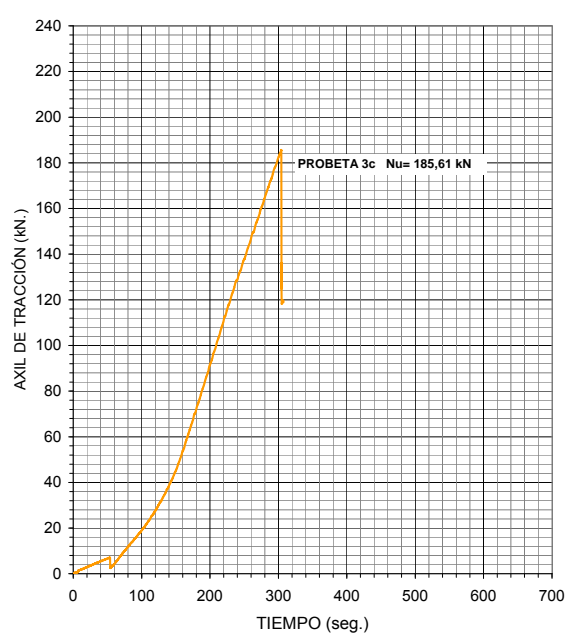
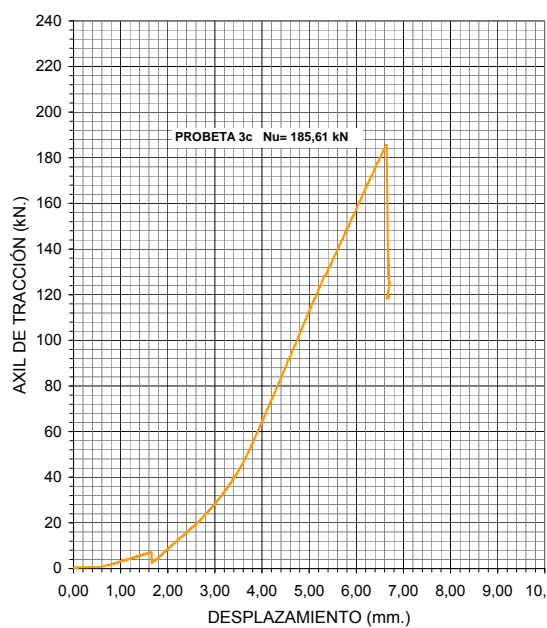


Ilustración II-109.- Probeta 3c.-Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo

PROBETA 4c



Ilustración II-110.- Probeta 4c. Ensayo de compresión.

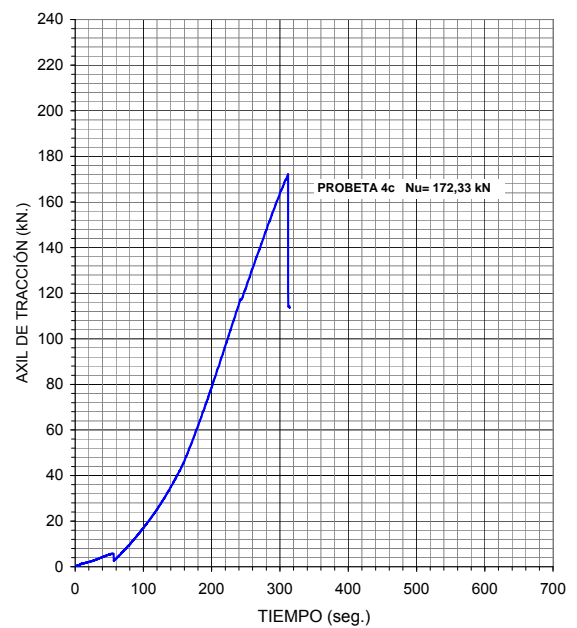
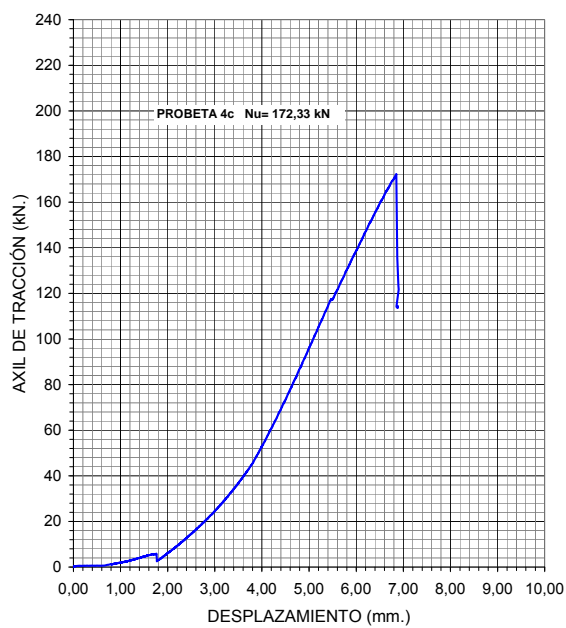


Ilustración II-111.- Probeta 4c.- Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo

PROBETA 12c



Ilustración II-112.- Probeta 12c. Ensayo de compresión.

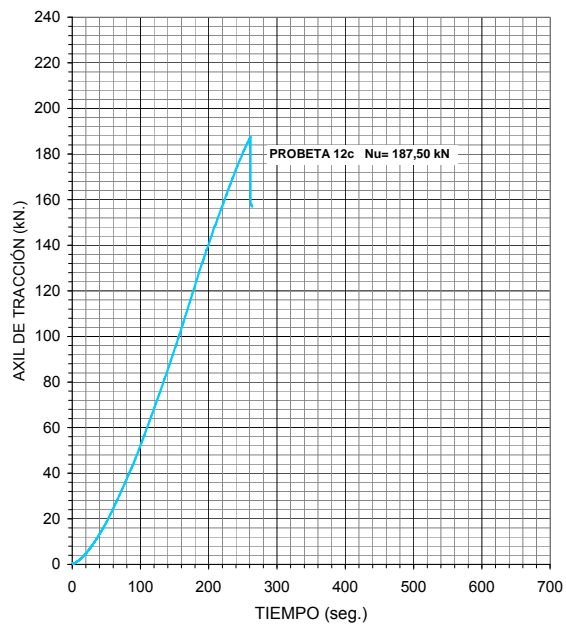
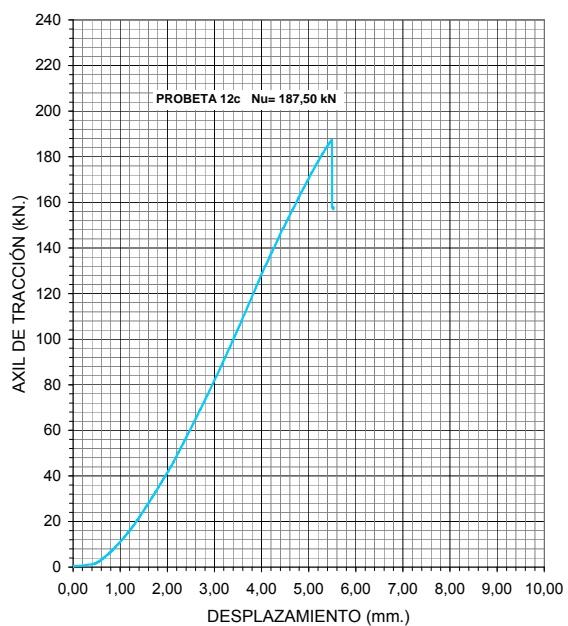


Ilustración II-113.- Probeta 12c.-Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo

PROBETA 14c



Ilustración II-114.- Probeta 14c. Ensayo de tracción



Ilustración II-115.- Probeta 14c. Ensayo de tracción

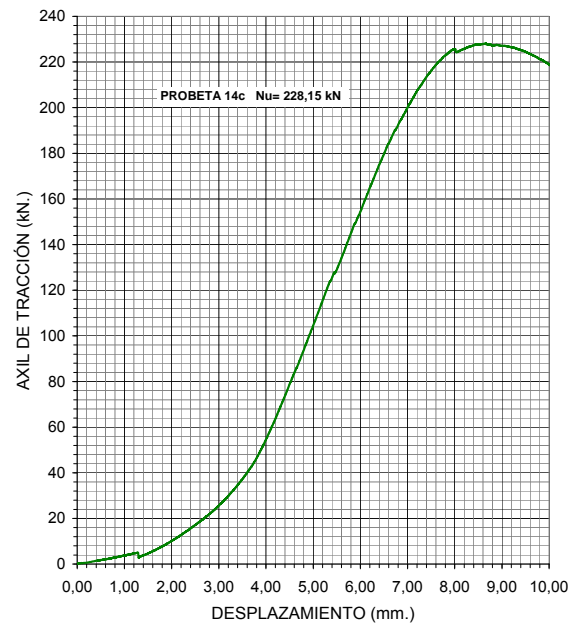
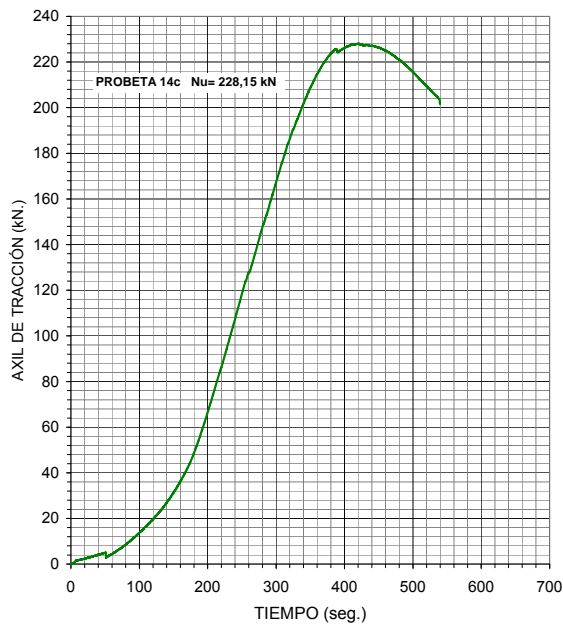


Ilustración II-116.- Probeta 14c.-Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo. Debido a la deformación del vástago metálico se aprecia claramente el incremento de desplazamiento sin incremento de carga

PROBETA 15c



Ilustración II-117.- Probeta 15c. Ensayo de compresión

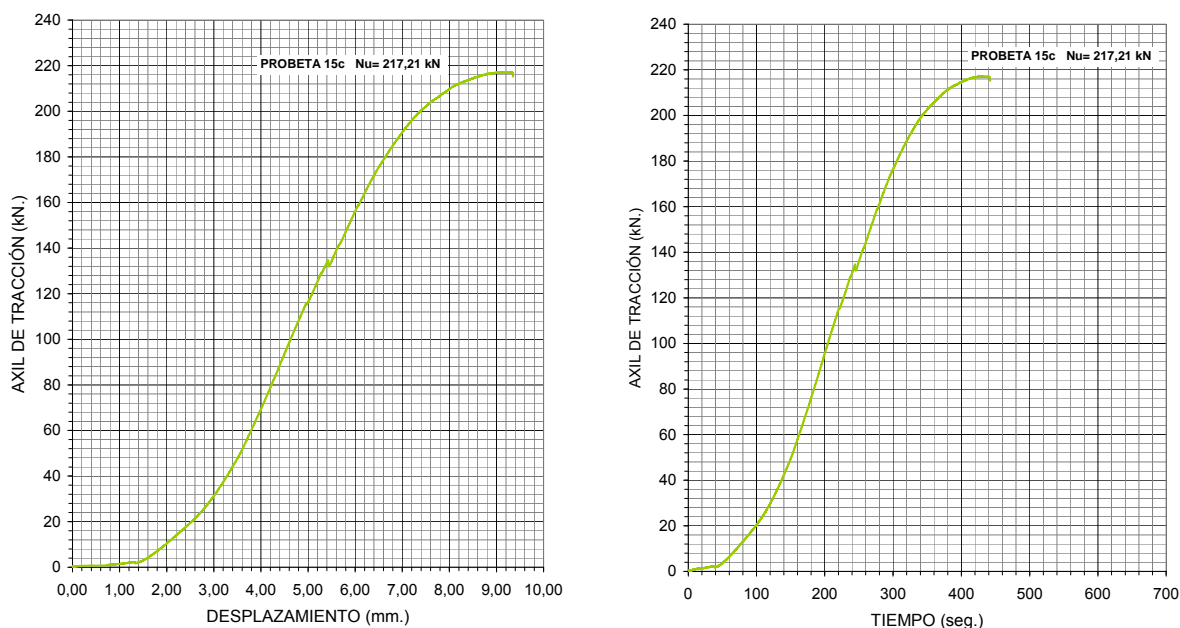


Ilustración II-118.- Probeta 15c.- Gráfica axil de tracción – desplazamiento / tiempo

TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESIÓN. CITEEC. SEGUNDA CAMPAÑA DE ENSAYOS.				
Probeta nº	Información	Duración (seg.)	Desplaz. (mm.)	Carga (kN)
Probeta 2c	Paredes rebajadas Taco macizo de frondosa (elondo)	448,94	6,81	181,94
Probeta 3c	Paredes rebajadas Taco macizo de frondosa (elondo)	304,07	6,64	185,61
Probeta 4c	Paredes rebajadas Taco macizo de frondosa (elondo)	311,89	6,85	172,33
Probeta 12c	Paredes de espesor constante Taco macizo de frondosa (elondo)	261,10	5,49	187,50
Probeta 12c bis	Probeta 12c ensayada de nuevo una vez alcanzada la rotura	323,01	6,66	156,36
Probeta 14c	Paredes de espesor constante Taco macizo de frondosa	421,66	8,66	228,15
Probeta 15c	Paredes de espesor constante Taco macizo de conifera	431,43	9,15	217,21

Los resultados obtenidos superan a los alcanzados en la primera campaña de ensayos. La disposición de la nueva placa de reparto troncopiramidal, con una elevada rigidez permite un reparto eficaz de las tensiones a toda la sección de madera.

Una vez alcanzada la rotura de la probeta en el ensayo de la probeta 12c se decide repetir el proceso de carga siendo significativo que su capacidad de carga se haya reducido solo un 17% respecto de la obtenida en el primer ensayo

En todas la probetas excepto en la 14c y 15c la rotura se produce por efecto del acuñado que el deslizamiento del taco interior rebajado produce en las paredes de las barras, en el caso del taco macizo con paredes de espesor constante este acuñamiento no se produce siendo especialmente indicativo que el ensayo tuviera que detenerse no por fallo de la sección de la barra hueca, sino debido a la deformación excesiva del vástago metálico.

Las cuatro probetas con igual solución de extremo (2c, 3c, 4c y 12c) proporcionan valores últimos muy similares, manteniendo la constancia de los resultados de las diferentes campañas de ensayos. Aun teniendo en cuenta la reducida población ensayada, el valor característico y medio de la muestra ensayada es un factor indicativo del excelente comportamiento de este diseño de enlace extremo de barra.

2ª Campaña de ensayos Ensayo de compresión. CITEEC	Probetas 2c, 3c, 4c y 12c
Valor medio. N_m	181,71 kN
Valor característico. N_k	172,12 kN

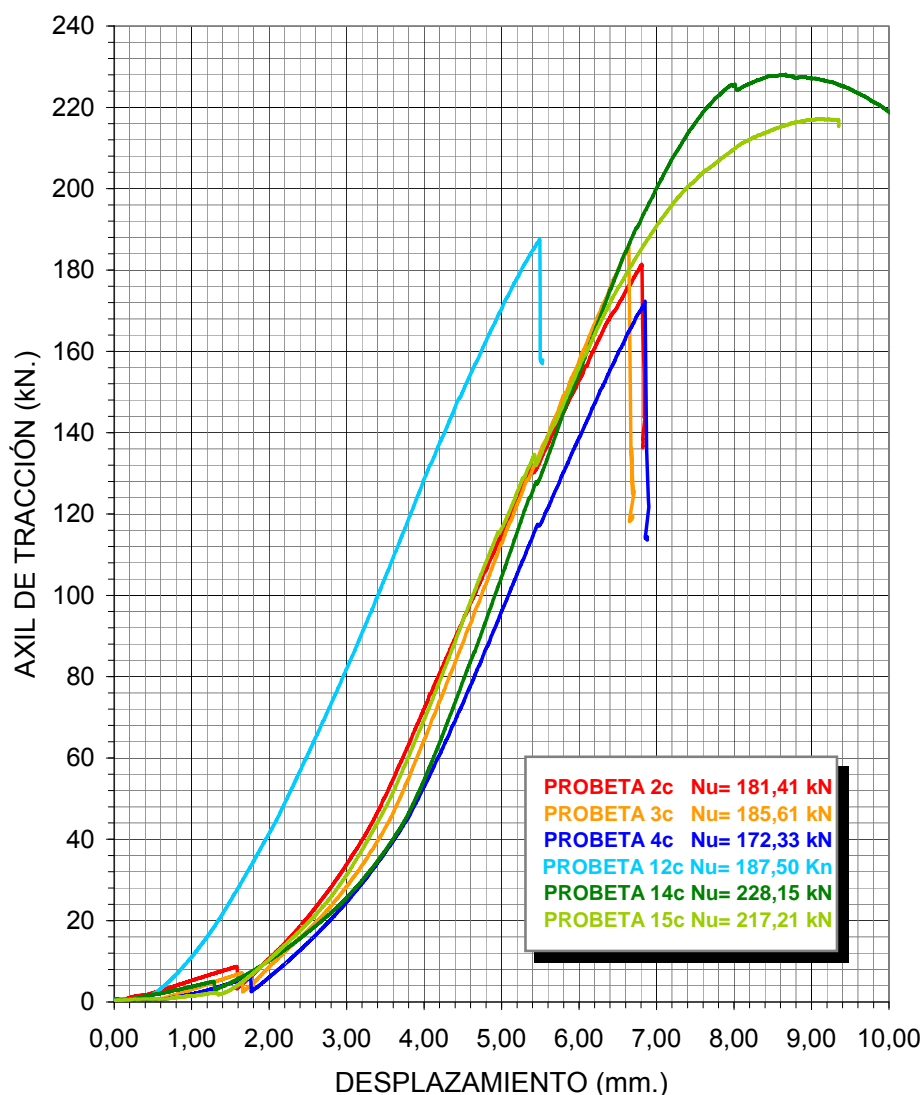


Ilustración II-119.- Gráfica axil de tracción – desplazamiento

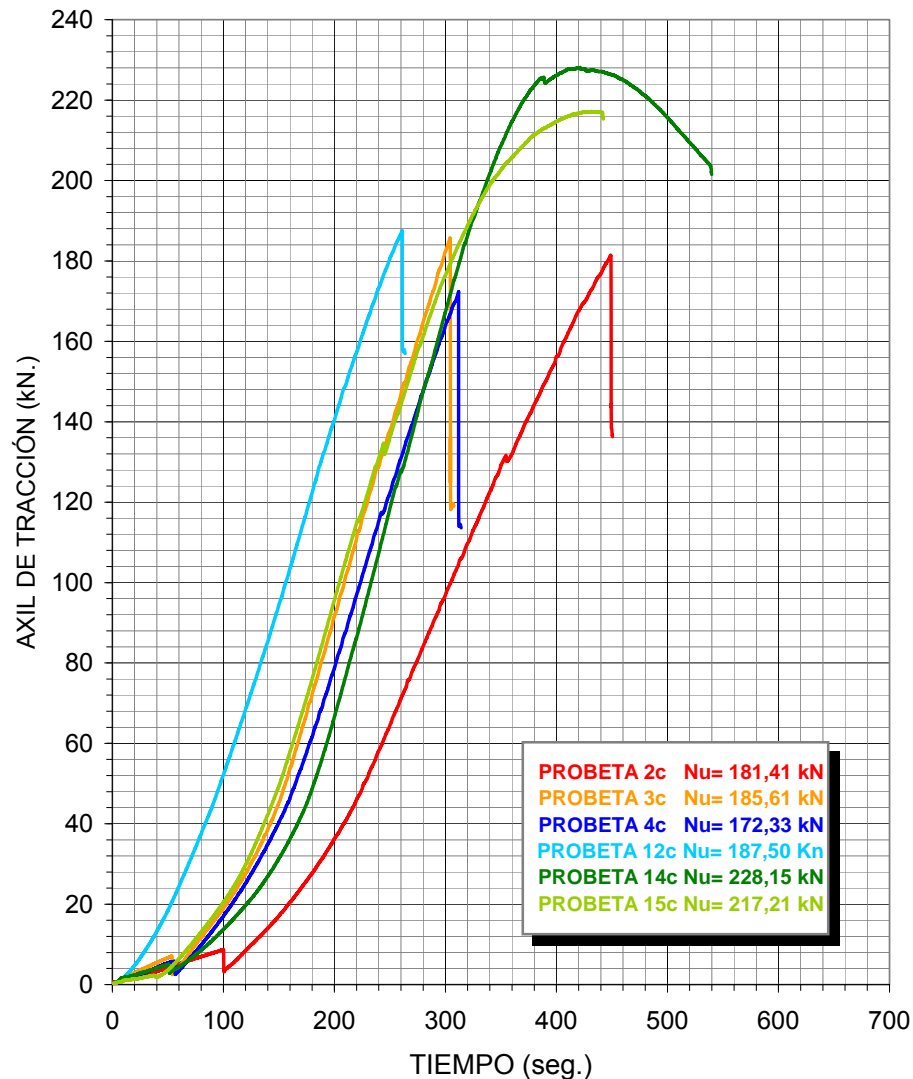


Ilustración II-120.- Gráfica axil de tracción – tiempo.

Las campañas de ensayos efectuadas evidencian el buen comportamiento del enlace de extremo de barra compuesto por un taco macizo de madera frondosa encolado a las barras laterales sin la realización de los rebajes extremos. Su geometría impide el acunamiento en el extremo del macizo y con la colocación de la nueva placa de reparto se consigue que las restricciones de carga admisible ante esfuerzos axiles de compresión no vengan determinadas por la sección de madera sino por las máximas deformaciones admisibles del vástago de acero.

En lo que respecta a los esfuerzos de tracción, se verifica en los ensayos que, con la realización de un encolado optimo entre las barras y el taco macizo realizado inmediatamente después del cepillado de la madera frondosa, no será necesaria la realización del rebaje en los extremos laterales de la barra hueca, compensando la perdida de sección transversal con el incremento de la longitud del taco macizo de madera frondosa, de manera que la superficie para la transmisión de esfuerzos cortantes permanezca invariable.

III.- DISEÑO Y DIMENSIONADO DEL NUDO DE ENLACE DE BARRAS

1.- DISEÑO DEL NUDO DE ENLACE

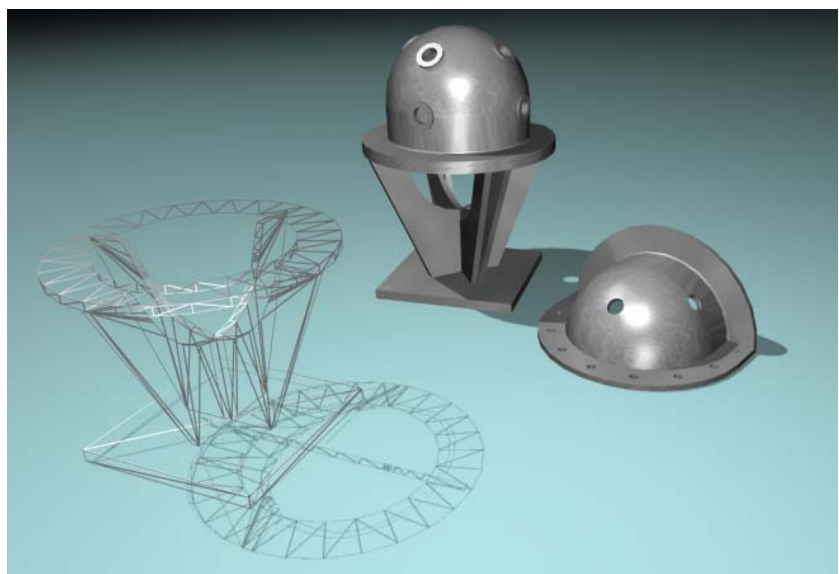
Una vez resuelto el diseño del enlace extremo de barra y ante el encargo por parte de la Universidad de A Coruña de realizar la cubrición de un espacio deportivo utilizando una malla espacial de madera, se diseñan dos tipo de nudos para realizar las uniones entre las barras de cada módulo y la unión entre módulos, el diseño de los nudos de enlace ha variado respecto a las propuestas anteriores atendiendo a las siguientes razones:

En primer lugar por razones de economía, el proceso de fabricación del nudo por estampación reduce notablemente la incidencia de la mano de obra y por tanto su coste unitario final, garantizando al mismo tiempo una mayor precisión y calidad en su acabado.

En segundo lugar el nuevo diseño permite la absorción en el proceso de montaje de las posibles tolerancias que puedan producirse en la fabricación de las barras de madera; al ser la primera experiencia en la construcción de una malla de estas características parece una decisión razonable.

Por último, dadas las reducidas dimensiones de las secciones empleadas era difícil de garantizar la viabilidad de la ocultación de los nudos con espesores tan reducidos de pared, sin causar con toda probabilidad el deterioro de la madera durante la manipulación y montaje de la estructura.

Se plantea entonces una nudo constituido por una semiesfera enlazada a un cilindro rematado con una aleta rigidizadora de borde. Este diseño se emplea en los nudos de la capa inferior y en los nudos de borde de la capa superior. Los restantes nudos de la capa superior son similares salvo que están divididos en dos mitades idénticas con unas bridas laterales de remate que sirven para el enlace directo entre los módulos.



*Ilustración III-1.-
Diseño de nudos de enlace*

Para la concepción del modelo sólido se utilizaron herramientas de generación paramétrica a partir de un perfil bidimensional dibujado con una serie de restricciones geométricas y dimensionales, procurando una nueva opción para la generación de modelos sólidos a las que habitualmente se utilizan en el seno del Departamento de Tecnología de la Construcción.

Cabe comentar en este punto que hasta la realización de los modelos de nudos que se recogen en la presente tesis doctoral, el intercambio de información entre aplicaciones informáticas, por parte del equipo investigador, se ha realizado a lo largo del tiempo fundamentalmente por dos caminos:

Formato DXF (Drawing interchange format)

El formato DXF es una representación de datos identificados de toda la información que pueda incluirse en un archivo de AutoCAD el término *Datos identificados* significa que cada elemento de datos del archivo va precedido de un número entero denominado código de grupo. El valor del código de grupo indicará el tipo de elemento de datos que sigue y su significado en relación con un tipo de objeto (o registro) dado.

Este formato se utilizó desde lo inicios del trabajo investigador para exportar las geometrías generadas con los programas de desarrollo propio de cálculo matricial de mallas espaciales a programas de dibujo asistido y visualización avanzada en aquel momento AutoCAD ver.12, Autoshade y 3D Studio 3.0.

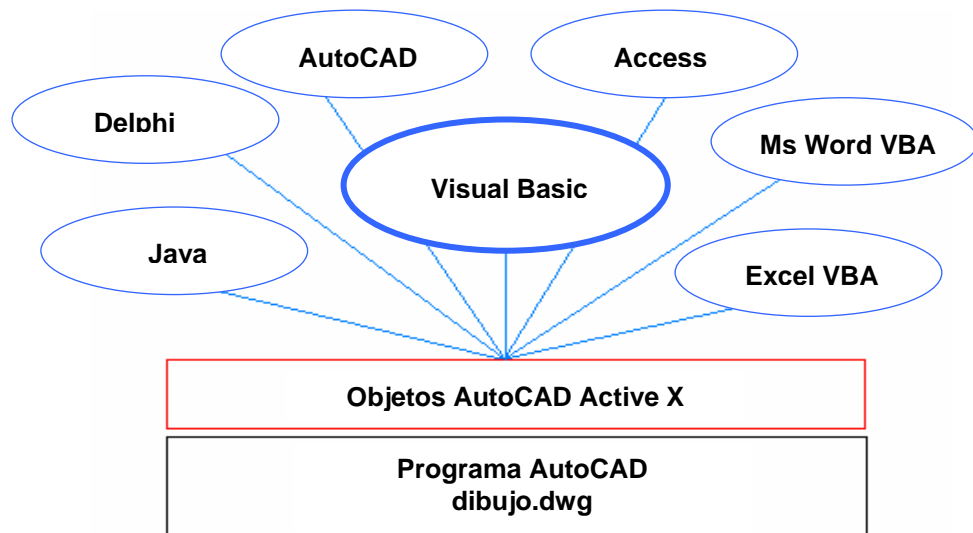
Ante la complicada definición de superficies complejas a través de la generación de un archivo DXF, se optó por la generación de modelos alámbricos que sirvieran como base para un posterior tratamiento en los programas de modelado de sólidos con la utilización de archivos de guión y utilidades programadas en lenguaje AutoLISP mediante los cuales se transmite al programa de diseño una secuencia de instrucciones.



La utilización de archivos de intercambio DXF pasa a un segundo plano con la aparición de entornos de programación orientada a objetos, que permiten el acceso a los métodos que controlan su comportamiento.

VBA. ActiveX. Visual Basic para aplicaciones

La posibilidad de realizar orientada una programación orientada a objetos ofrece un potente mecanismo para manipular los programas de diseño asistido desde el propio programa o desde fuera de él. Este método consiste en exponer los objetos al “mundo exterior” para acceder a ellos desde numerosos entornos y lenguajes de programación.



En su tesis doctoral Javier Álvarez Pablos, explora a un altísimo nivel, esta nuevas capacidades gráficas utilizando herramientas que permiten conseguir desde la programación, modelizaciones automatizadas de realidades complejas. Un software tan difundido como AutoCAD pasa a convertirse en una ventana más del programa creado en Visual Basic para el análisis de mallas modulares de barras huecas de madera laminada, siendo así posible generar el modelo tridimensional de la estructura representando la geometría detallada de sus componentes mientras en un segundo plano se utilizan las prestaciones de programas de gestión de bases de datos, como Microsoft Access, para el almacenamiento y acceso a tablas de secciones o salidas de resultados.

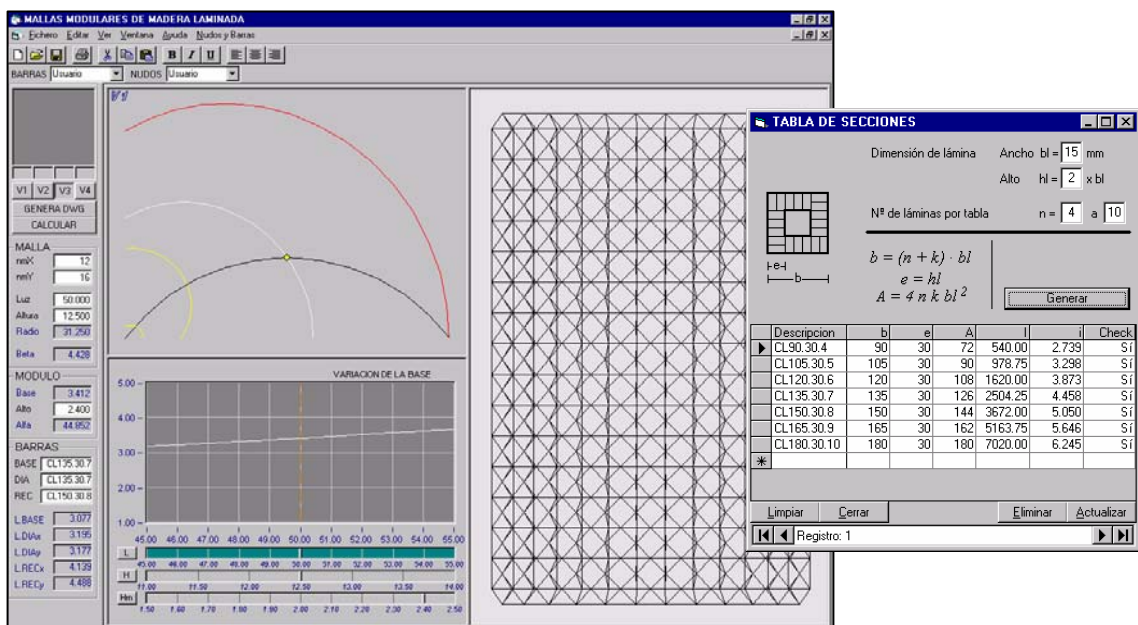


Ilustración III-2.- Programa Mallas modulares de madera laminada. Javier Alvarez Pablos. 1998

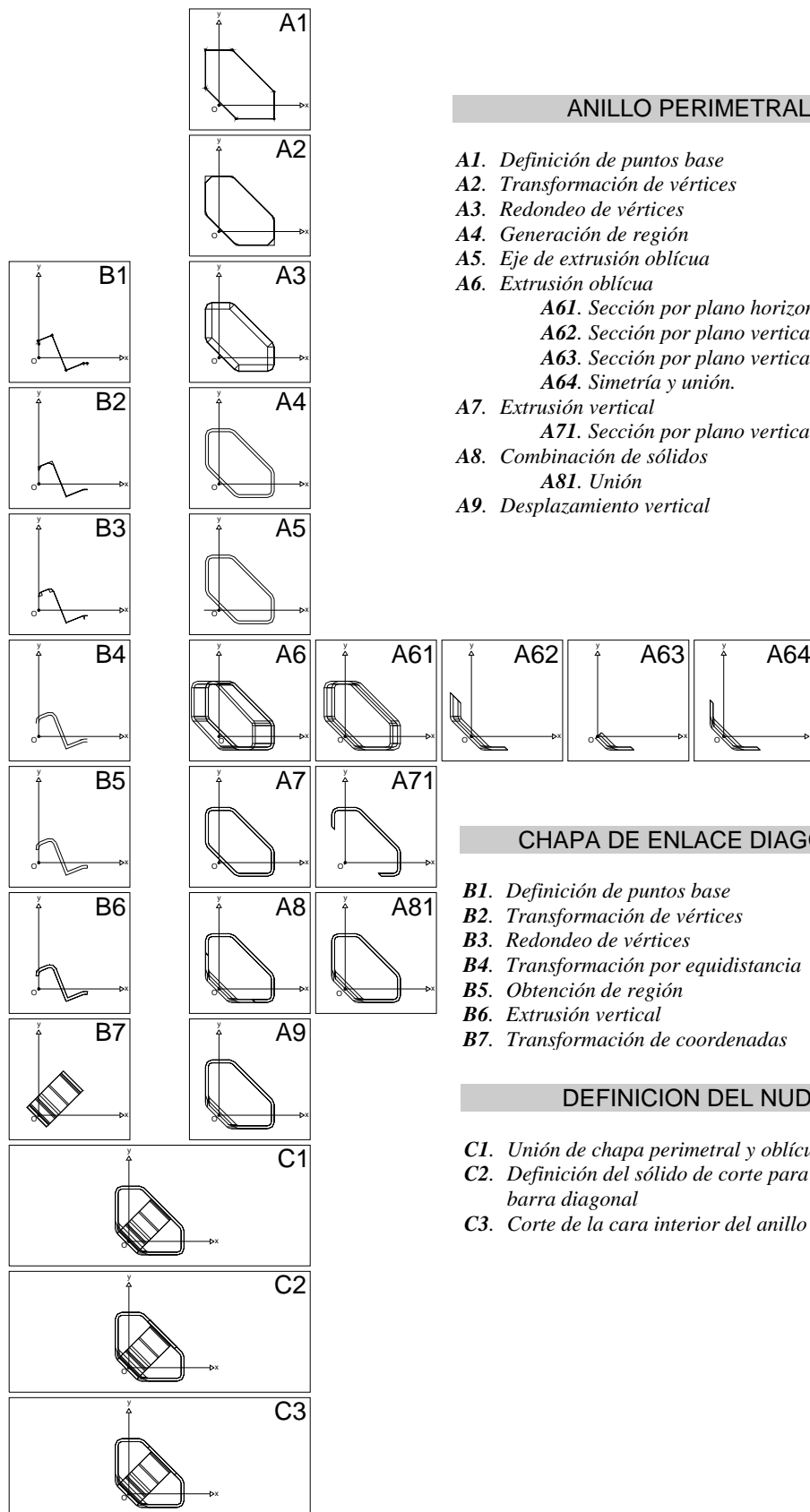
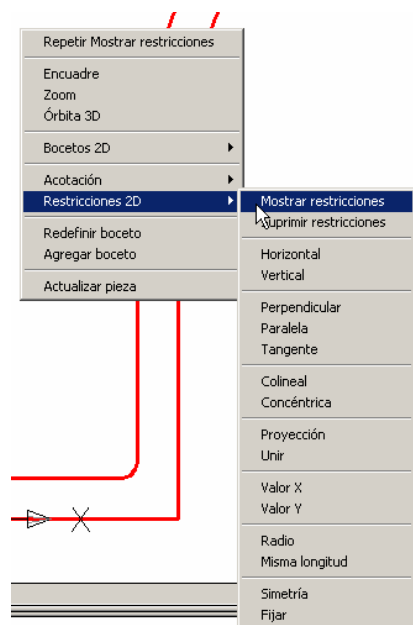


Ilustración III-3.- Proceso de generación de nudo. Javier Alvarez Pablos. 1998

El gran desarrollo del software de modelado de sólidos permite la apertura de una tercera vía en la generación de geometrías; se trata de realizar un perfil básico en dos dimensiones, aplicarle una serie de restricciones geométricas y dimensionales que permitan su parametrización para posteriormente convertirlo a un elemento sólido tridimensional de forma que cualquier modificación posterior de la geometría 2D repercuta automáticamente en el sólido final.



Las restricciones geométricas utilizadas para construir el perfil generador son del tipo:

- ☐ Restricción horizontal
- ☐ Restricción vertical
- ☐ Punto fijo
- ☐ Restricción tangencial
- ☐ Restricción concéntrica

Ilustración III-4.- Restricciones 2d disponibles

Las restricciones dimensionales precisan la longitud, el radio o el ángulo de rotación de los elementos geométricos de un boceto. A diferencia de las restricciones geométricas, las cotas son paramétricas. Al modificarse sus valores, la geometría también cambia.

Las cotas pueden expresarse como constantes numéricas o como ecuaciones. Aunque ambas formas se pueden utilizar indistintamente, cada una tiene sus aplicaciones específicas. Las constantes numéricas son de utilidad cuando un elemento geométrico es de tamaño invariable y no está relacionado con ningún otro elemento geométrico. Las ecuaciones son útiles cuando el tamaño de un elemento geométrico es proporcional al tamaño de otro.

OPERADORES VÁLIDOS PARA LA EXPRESIÓN DE COTAS COMO ECUACIONES			
^	Exponente	+	Suma
-	Resta	*	Multipliación
/	Dividir	%	Módulo (resto)
raíz	Raíz cuadrada	log	Logaritmo
ln	Natural	infer	Redondea hasta el logaritmo entero inmediatamente inferior
sup	Redondea hasta el entero inmediatamente superior	sen	Seno
cos	Coseno	tan	Tangente
asen	Arcoseno (seno -1)	acos	Arcocoseno (coseno -1)
atan	Arcotangente (tangente-1)	senh	Seno hiperbólico
cosh	Coseno hiperbólico	tanh	Tangente hiperbólica
pi	pi	b	Número base de logaritmo natural

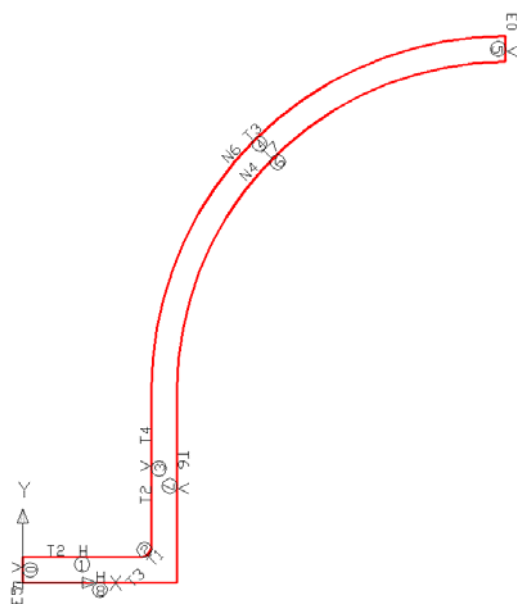


Ilustración III-5.- Restricciones geométricas

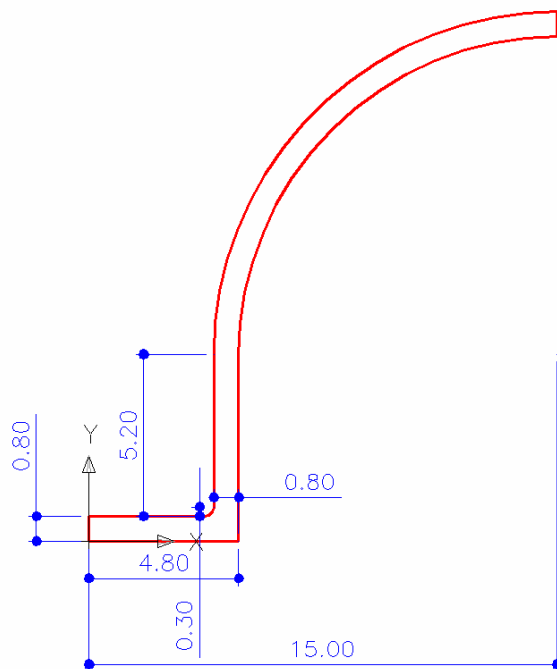


Ilustración III-6.- Restricciones dimensionales

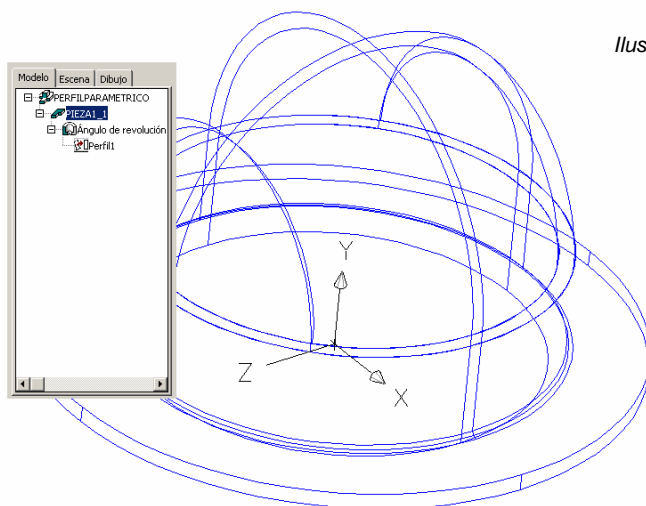


Ilustración III-7.- Nudo con ángulo de revolución de 360°

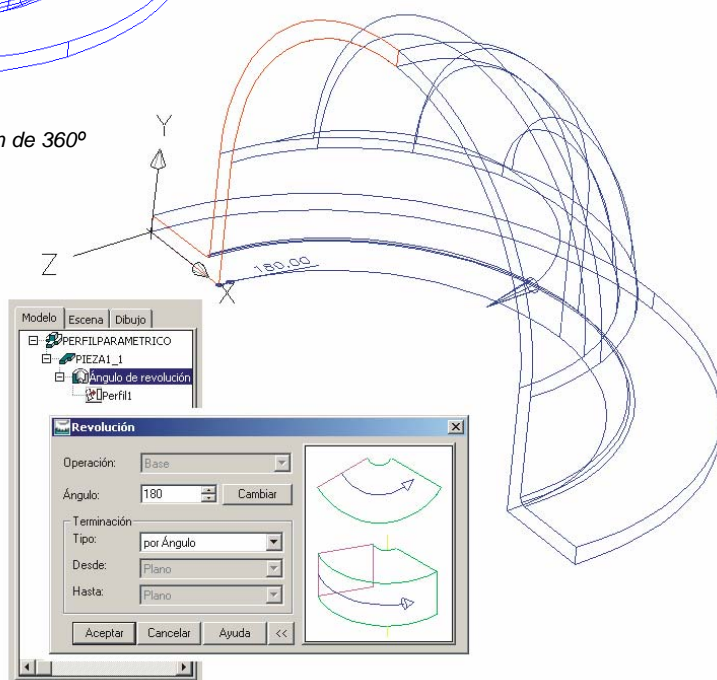


Ilustración III-8.- Nudo con ángulo de revolución 180°

MODELADO DE SÓLIDOS

Una vez obtenido el perfil base, es sencilla la obtención de diferentes geometrías del nudo, con diferentes espesores, en la ilustración se muestra el proceso de generación de piezas con espesores de 10, 12, 14, 16, 18, 20 y 22mm. previo a su introducción en el programa de cálculo numérico.

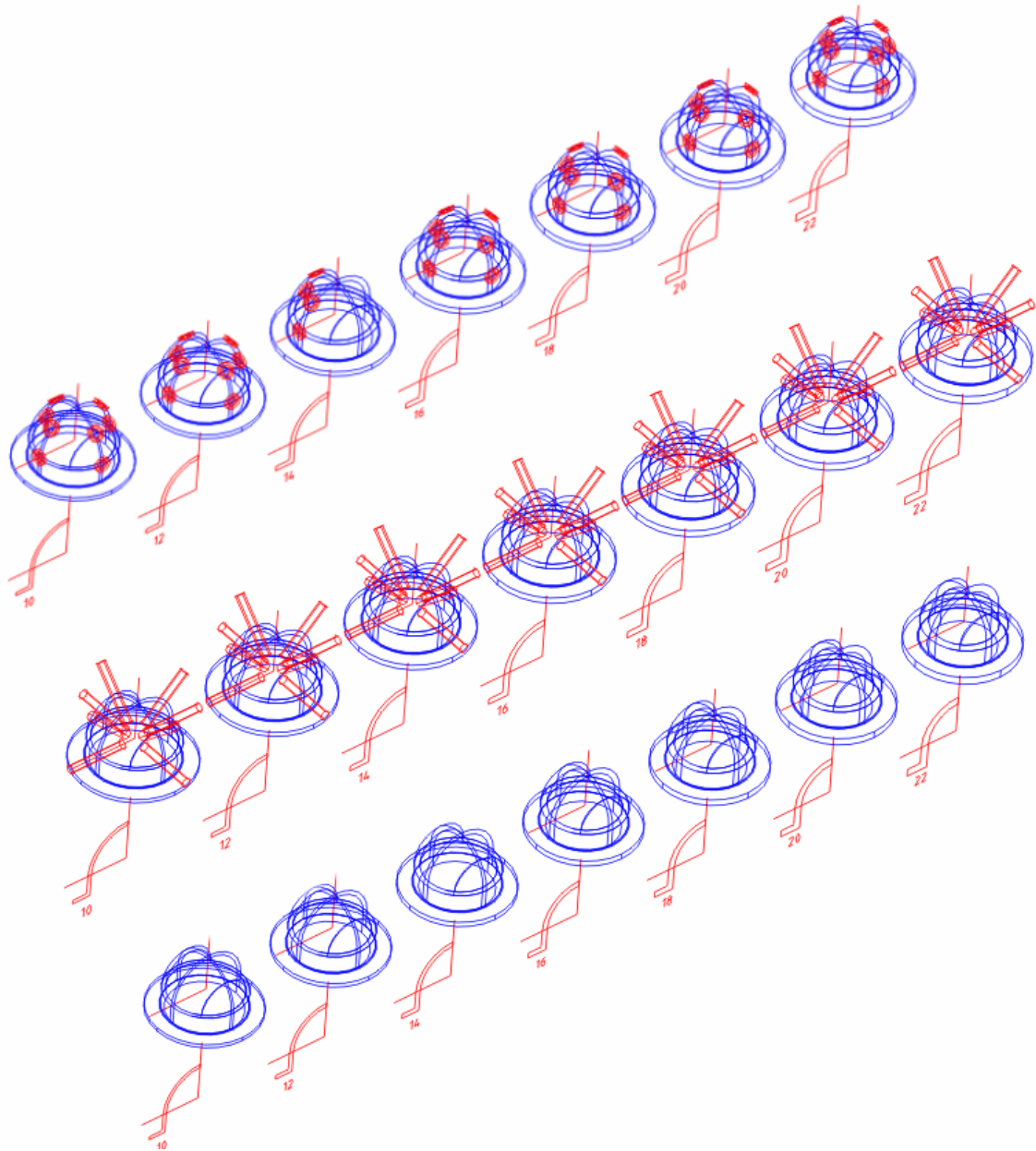


Ilustración III-9.- Generación del nudo inferior con diferentes espesores.

Una vez obtenido el sólido base, se accede al *objeto Application* raíz del modelo de objetos de ActiveX Automation de AutoCAD que sirve de puerta de enlace con cualquiera de los demás objetos del dibujo y con los métodos y propiedades que estos tengan asignados.

Utilizando métodos de creación y modificación de entidades se generan los agujeros del nudo. Las arandelas que aseguran la transmisión de esfuerzos en la zona de transición entre la esfera y el cilindro se modelizan para incorporar su geometría al programa de cálculo por elementos finitos, una vez validado su diseño se envía el modelo sólido creado a la empresa “MAXIMINO SEOANE, S.L.” en donde se procederá a su fabricación con la ayuda de una máquina de control numérico.

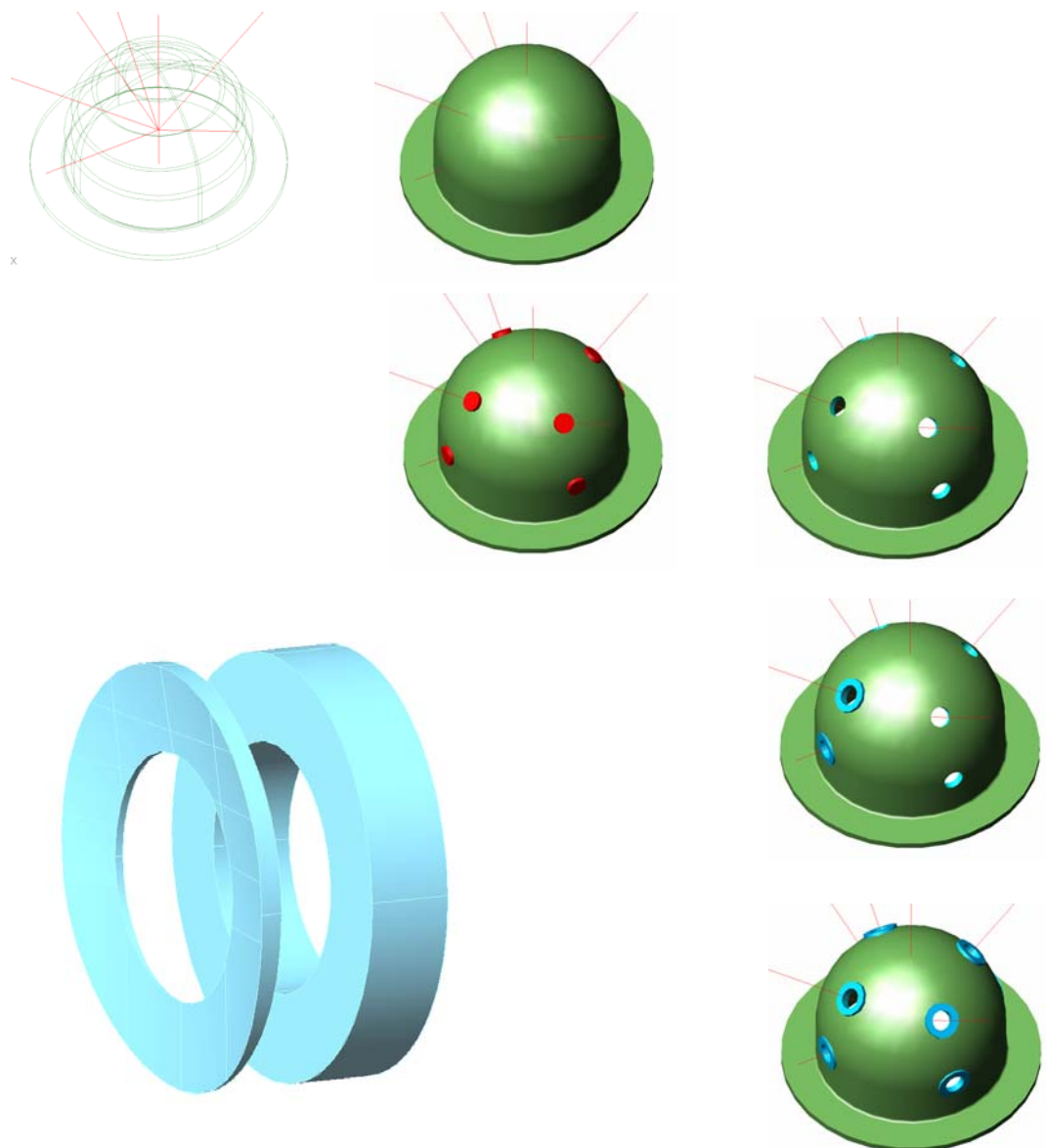


Ilustración III-10.- Proceso de modelado del nudo inferior de la malla
Arandela de contacto entre superficies de doble y simple curvatura

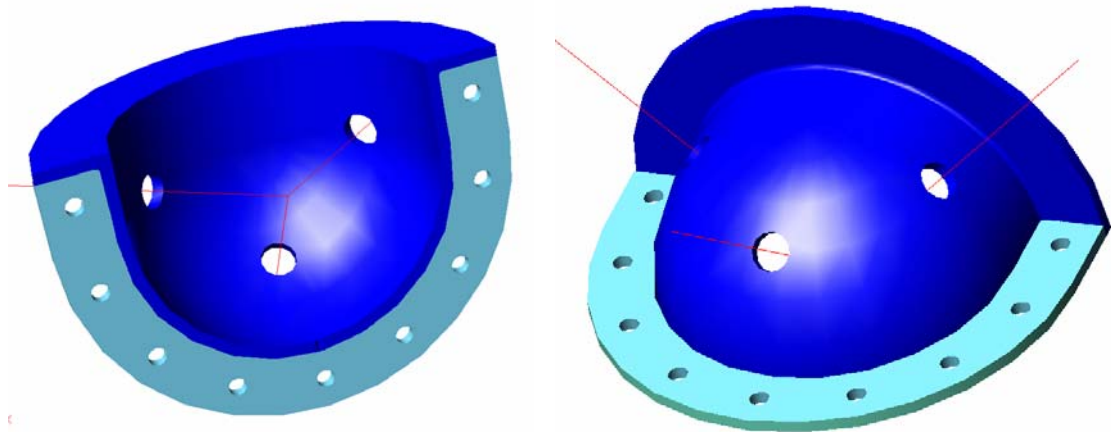


Ilustración III-11.- Nudo superior del modulo semioctaédrico.

GENERACIÓN DE ARCHIVO DE INTERCAMBIO IGES

El nudo así construido necesita ser validado desde el punto de vista estructural, mediante un programa de cálculo por elementos finitos. Atendiendo a los resultados obtenidos en el mismo, será necesario el ajuste del nudo hasta su dimensionado definitivo. El formato de intercambio utilizado para la implementación de geometrías complejas procedentes de programas de dibujo asistido en programas de cálculo por elementos finitos es el denominado IGES (Initial Graphics Exchange Specification) en el que se define un formato neutral para el intercambio de información entre sistemas CAD / CAM

Organización general de un archivo IGES

⇒ Flag section	C	en columna 73
⇒ Start section	S	"
⇒ Global section	G	"
⇒ Directory entry section	D	"
⇒ Parameter data entry	P	"
⇒ Terminate section	T	"

Se ha elaborado un archivo de intercambio con la opciones óptimas para realizar una eficiente exportación preservando la geometría y funcionalidad de las entidades del sólido inicial en el momento de su importación a la base de datos de ANSYS.

Los parámetros más significativos de exportación al formato **IGES 5.3** se indican a continuación:

Titulo: IGESOUT Journal (R2000i built May 19 2001 for 15.06s (LMS Tech) on
Microsoft Windows NT Version 5.0 (x86))
=====

Archivo: D:\iges\ansyssan\nudo86.xlo
Fecha: Martes, 4 / Sept / 2001
Hora: 18:00:13
=====

De: Archivo de dibujo AutoCAD 2002
D:\PP\Tesis\nudo-ansys\nudoparametrico\nudo8.dwg

Al archivo IGES:
D:\iges\ansyssan\nudo86.igs

=====

Archivo de opciones: D:\PP\Tesis\nudo-ansys\nudoparametrico\nudomalla.opt

Descripción: Opciones para nudo de malla

Unidades: Milímetros

IGES Version: 5.3

B-REP Solids mapeado a IGES Bounded/Trimmed Surface (tipo 143/144).

Todas las "trimmed surfaces" mapeadas a entidades "IGES Bounded Surface" (Tipo 143).

Resumen de entidades AutoCAD

Entidad	Encontrada	Procesada	Errores
Capa (Layer)	2	2	0
Tipo de Línea (Linetype)	1	1	0
Spacio Papel (Paper Space (Viewport id 1)	2	2	0
Solido (Solid 3D)	1	1	0
Totales	6	6	0

Archivo de entrada: D:\PP\Tesis\nudo-ansys\nudoparametrico\nudo8.dwg
 Archivo de entrada: D:\iges\ansyssan\nudo86.igs
 ID Systema: AutoCAD-15.06s (LMS Tech) (Microsoft Windows NT Version 5.0 (x86))
 Versión Preprocessor: Autodesk IGES Translator R2000i (May 19 2001) from Autodesk, Inc.
 Size of Integer: 32
 Sgl. Precision Mag: 38
 Sgl. Precision Sig: 6
 Dbl. Precision Mag: 99
 Dbl. Precision Sig: 15
 Model Space Scale: 1.000000e+000
 Unit Flag: 2
 Unit String: MM
 # of Line Weights: 211
 Maximum Line Width: 2.110000e+000
 Creation Date: 11/13/2001 18:00:14
 Minimum Resolution: 1.746656e-008
 Maximum Coordinate: 1.746656e+001
 IGES Version Number: 11 (IGES 5.3)
 Drafting Standard: 0
 Protocol Description:

Resumen de entidades IGES

Tipo	Descripción	Número
126	Rational B-Spline Curve (General)	496
128	Rational B-Spline Surface (General)	54
141	Boundary Entity	68
143	Bounded Surface	54
406	Property (Level Function)	1
Total		673

2.- ANÁLISIS NUMÉRICO

Se realiza un análisis estático del nudo de enlace de barras para la determinación de sus desplazamientos, esfuerzos y reacciones, suponiendo una estructura elástica lineal bajo la actuación de cargas aplicadas y con desplazamientos pequeños en comparación con las fuerzas aplicadas. La ecuación básica de este tipo de análisis es:

ECUACIÓN BÁSICA	
$[K] [u] = [F]$	
Esta ecuación representa un sistema de ecuaciones que se resuelven por el método frontal donde:	
K	Matriz de rigidez de la estructura
u	Vector de desplazamientos de los nudos
F	Vector de cargas

Para la modelización de la pieza se utiliza un elemento sólido estructural tridimensional constituido por 20 nudos con tres grados de libertad cada uno, permitiendo por tanto el desplazamiento de cada nudo en las tres direcciones [x, y, z]

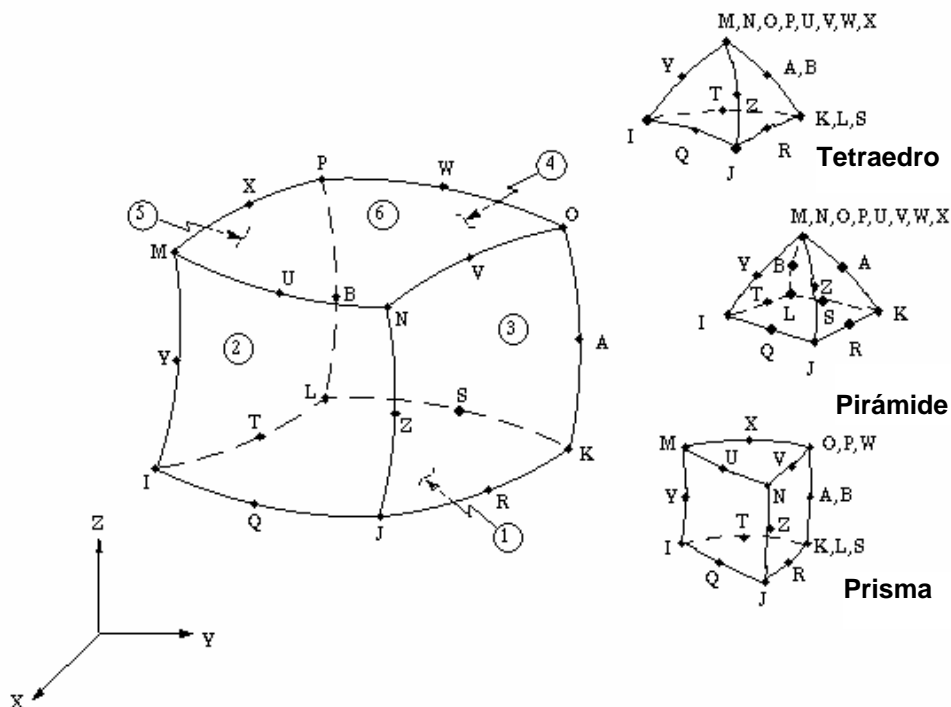


Ilustración III-12.- Elemento sólido tridimensional. SOLID95

Para el análisis del modelo, el elemento tridimensional puede adoptar diferentes formas haciendo coincidir determinados nudos en un mismo punto del espacio con la única restricción de que su volumen no puede ser cero:

Opción	Nudos coincidentes en el espacio		
Prisma:	K, L, S	A, B	O, P y W
Tetraedro	A, B	K, L, S	M, N, O, P, U, V, W, X
Pirámide	M, N, O, P, U, V, W, X		

El elemento SOLID 95 admite la aplicación de presiones sobre sus caras, estas se identifican de acuerdo con la tabla siguiente:

Cara	Nudos que definen cada cara
1	J - I - L - K
2	I - J - N - M
3	J - K - O - N
4	K - L - P - O
5	L - I - M - P
6	M - N - O - P

Tras el cálculo, la salida de resultados asociada al elemento se muestra de dos formas en primer lugar se obtienen los desplazamientos de los nudos, contenidos en la solución global y en segundo lugar se obtienen los resultados por elemento de acuerdo con la ilustración [III-13]

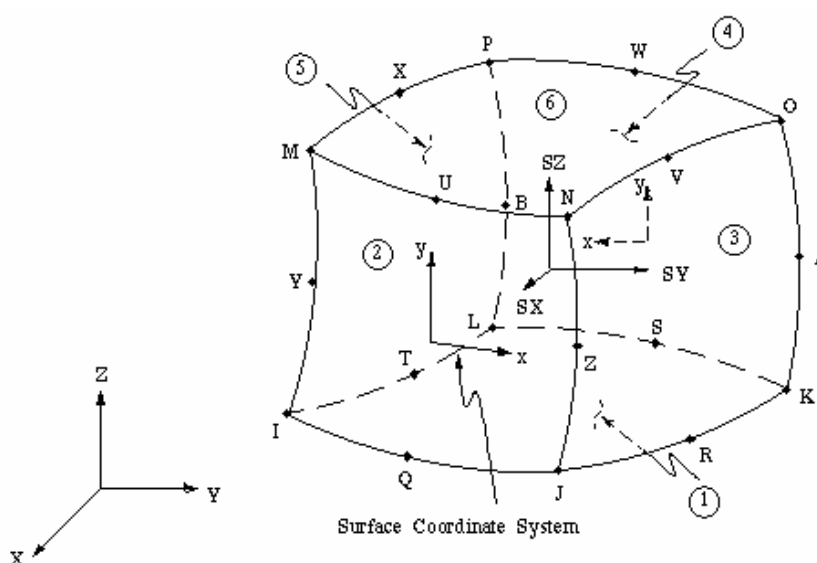


Ilustración III-13.- Salida de resultados por elemento

La direcciones de la tensiones son paralelas al sistema de coordenadas global del elemento, obteniendo las tensiones en cada una de las caras del elemento con referencia al sistema de coordenadas local de cada cara. A modo de ejemplo se muestra en la ilustración III-13 el sistema de coordenadas de las caras I-J-N-M y K-L-P-O.

Del cálculo numérico se pueden obtener entonces los siguientes resultados:

- ❑ Desplazamientos respecto a los ejes X e Y
- ❑ Tensiones S_x , S_y , S_{xy} , que son respectivamente las tensiones respecto a los ejes X, Y y las tensiones de cortadura XY
- ❑ Tensiones principales, S_1 , S_2 , S_3
- ❑ Tensiones de cortadura: $S_I = \max [|S_1 - S_2|, |S_2 - S_3|, |S_3 - S_1|]$
- ❑ Tensión de Von Misses o Tensión Equivalente:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Del cálculo de la malla espacial realizado de acuerdo con lo especificado en el capítulo siguiente se obtienen los esfuerzos axiles que las barras de la malla transmiten a los nudos. Para el dimensionado del nudo de enlace de barras se toman las situaciones combinatorias más desfavorables estimándose, en definitiva, cuatro hipótesis para el cálculo. Se resuelve la vinculación exterior del modelo fijando una de las arandelas en el espacio, aplicando las cargas por unidad de superficie sobre las arandelas restantes tal y como se aprecia en la imagen inferior. En las páginas siguientes se recoge el archivo de entrada de datos utilizado para el calculo del nudo por el método de los elementos finitos

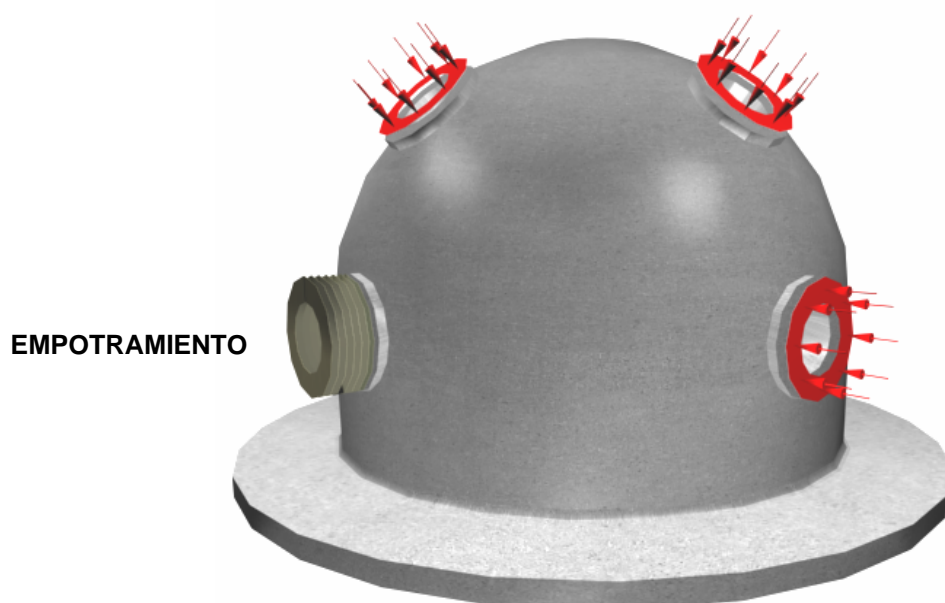


Ilustración III-14.- Esquema de la vinculación exterior del nudo inferior; esquema de aplicación de cargas.

ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS

```
! ENTRADA DE DATOS NUDO PARAMETRICO TESIS DOCTORAL
! IMPORTADO DESDE MECHANICAL DE AUTODESK
! MODELADO COMO SOLIDOS TRIDIMENSIONAL (SOLID 95 3-D)
! PARA LA SIMULACION DEL NUDO DE LA MALLA DE MADERA
! MODELO DEFINITIVO APOYADO EN REACCIONES.
!
! JOSE A. VAZQUEZ. SEPTIEMBRE 2001.
!
! ANSYS REVISION 5.4          ED          04:56:43    02/11/2001
! nudo de espesor 10 mm

/FILNAME,nudo410
/TITLE,NUDO TIPO 4.10

! opciones de dibujo para visualizacion de la estructura

/VIEW,ALL, 1, 1, 1
/TRIAD,LBOT

/WIN,ALL,ON
/VUP,all,z          !todas las ventanas con z positivo

!*****
! IMPORTACION DESDE AUTOCAD MECHANICS
!*****

/AUX15
IOPTN,IGES,DEFAULT
!IOPTN,IGES,ALTERNATE      !alternativa, si falla el anterior
IOPTN,MERGE,yes
IOPTN,SOLID,YES
IGESIN,nudo410,igs,
vplot
finish

!*****
! PREPOCESADOR
!*****

/PREP7

!*****
! DEFINICION DATOS DE ENTRADA PARAMETRIZADOS
!*****

!variables auxiliares
*set,malla,1          !densidad de mallado, 2 mal agujeros, 1 bueno
                        !0.5 mejor, pero lenta, 1.5 bastante bien, 3 prueba
!variables empleadas para cargas
*set,sup,8.65         !area de la arandela donde se aplica carga cm2

!caso de carga 1
*set,fx11,6089         !x izquierda
*set,fx21,101          !x sup izq
*set,fx31,1861         !x sup der
*set,fx41,4852         !x derecha
*set,fy11,12702        !y sup
*set,fy21,-964         !y sup sup
*set,fy31,-958         !y inf sup
*set,fy41,12683        !y inf

!caso de carga 2
*set,fx12,4121         !x izquierda
*set,fx22,-7           !x sup izq
*set,fx32,-1360        !x sup der
*set,fx42,6089         !x derecha
*set,fy12,14507        !y sup
*set,fy22,-51          !y sup sup
*set,fy32,-45          !y inf sup
*set,fy42,14563        !y inf
```

```

!caso de carga 3
*set,fx13,15562      !x izquierda
*set,fx23,-494      !x sup izq
*set,fx33,1355      !x sup der
*set,fx43,14254     !x derecha
*set,fy13,14563     !y sup
*set,fy23,-1233     !y sup sup
*set,fy33,462       !y inf sup
*set,fy43,13369     !y inf

!caso de carga 4
*set,fx14,0          !x izquierda
*set,fx24,9870       !x sup izq
*set,fx34,-6391      !x sup der
*set,fx44,11492      !x derecha
*set,fy14,5672       !y sup
*set,fy24,-3701      !y sup sup
*set,fy34,-24        !y inf sup
*set,fy44,2837       !y inf

!
! DEFINICIÓN DE MATERIALES
!

ET,1,95              ! elemento solido de 20 nudos isoparametrico

!*****
! acero laminado
!*****

MP,EX,1,2.1e6        ! Modulo de Young en kg/cm2
MP,EY,1,2.1e6
MP,EZ,1,2.1e6

MP,GXY,1,810000      ! Modulo trasnversal kg/cm2
MP,GYZ,1,810000
MP,GXZ,1,810000

MP,NUXY,1,0.30       ! modulo de Poisson
MP,NUXZ,1,0.30
MP,NUYZ,1,0.30

MP,DENS,1,.00785     ! Densidad acero laminado en kg/cm3

MP,ALPX,1,0.000012   !dilatacion termica
MP,ALPY,1,0.000012
MP,ALPZ,1,0.000012

!*****
! MALLADO
!*****

MAT,1                ! acero, volumen
TYPE,1
eshape,1
esize,malla          ! tamaño de elemento

VMESH,all

!FIN, SALIDA DE PRE-PROCESADOR

waves                !reordena
wsort,all
SAVE                 ! el que guarda no pierde....

FINISH

```

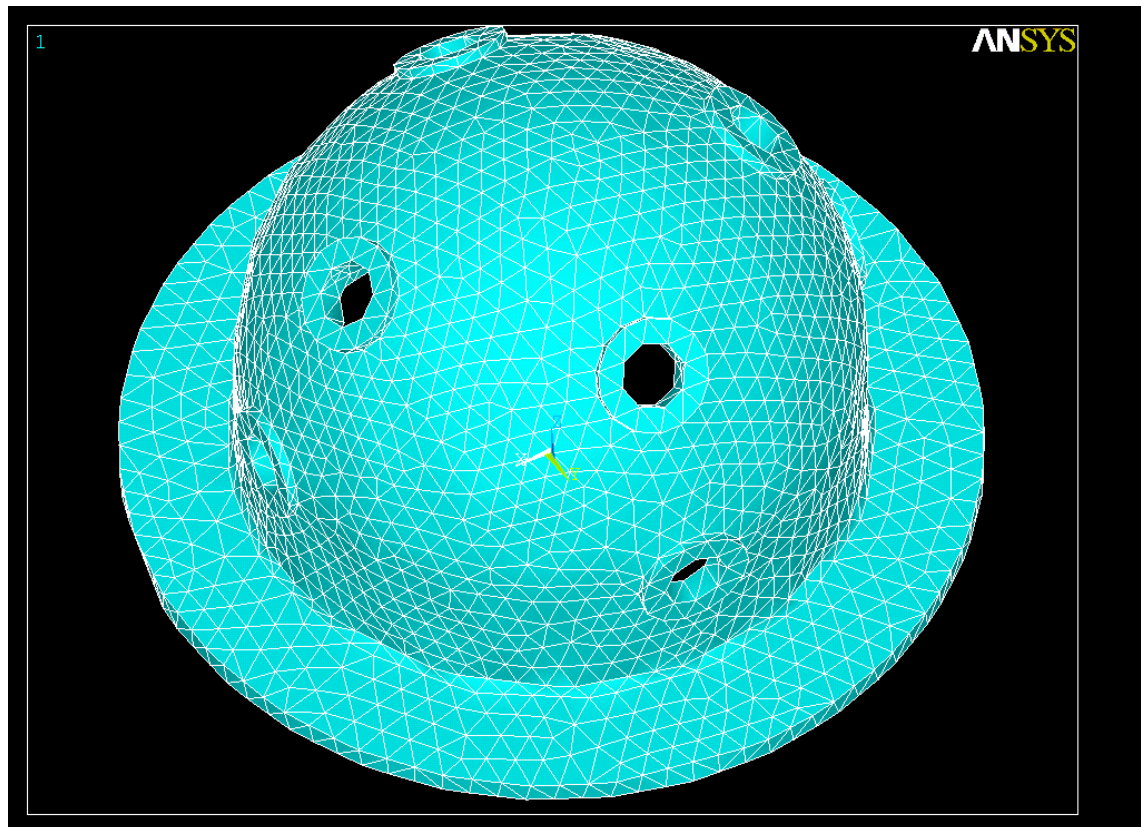



Ilustración III-15.- Nudo inferior de enlace. Mallado.

```

! *****
! CARGAS Y APOYOS
! *****

/SOLU
ANTYPE,stat,new          ! lineal, estatico

! *****
! CARGA POR HIPOTESIS
! *****

! *****
! CASO DE CARGA 1
! *****
asel,s,,47                !selecciona un area
nsla,s,1                  !selecciona los nudos del area anterior
d,all,ux,0                !apoyo fijo
d,all,uy,0
d,all,uz,0
nsel,all
asel,all

sfa,47,1,pres,-fx11/sup   !x izquierda
sfa,15,1,pres,-fx21/sup   !x sup izq
sfa,20,1,pres,-fx31/sup   !x sup der
sfa,30,1,pres,-fx41/sup   !x derecha
sfa,25,1,pres,-fy11/sup   !y sup
sfa,3,1,pres,-fy21/sup    !y sup sup
sfa,10,1,pres,-fy31/sup   !y inf sup
sfa,42,1,pres,-fy41/sup   !y inf
lswrite

! *****
! CASO DE CARGA 2
! *****
!lsclear,all              !borra cargas anteriores
asel,s,,47                !selecciona un area
nsla,s,1                  !selecciona los nudos del area anterior
d,all,ux,0                !apoyo fijo
d,all,uy,0
d,all,uz,0
asel,all
nsel,all

```

```

sfa,47,1,pres,-fx12/sup !x izquierda
sfa,15,1,pres,-fx22/sup !x sup izq
sfa,20,1,pres,-fx32/sup !x sup der
sfa,30,1,pres,-fx42/sup !x derecha
sfa,25,1,pres,-fy12/sup !y sup
sfa,3,1,pres,-fy22/sup !y sup sup
sfa,10,1,pres,-fy32/sup !y inf sup
sfa,42,1,pres,-fy42/sup !y inf
lswrite

!*****
! CASO DE CARGA 3
!*****
!lsclear,all !borra cargas anteriores
asel,s,,47 !selecciona un area
nsla,s,1 !selecciona los nudos del area anterior
d,all,ux,0 !apoyo fijo
d,all,uy,0
d,all,uz,0
asel,all
nsl,all

sfa,47,1,pres,-fx13/sup !x izquierda
sfa,15,1,pres,-fx23/sup !x sup izq
sfa,20,1,pres,-fx33/sup !x sup der
sfa,30,1,pres,-fx43/sup !x derecha
sfa,25,1,pres,-fy13/sup !y sup
sfa,3,1,pres,-fy23/sup !y sup sup
sfa,10,1,pres,-fy33/sup !y inf sup
sfa,42,1,pres,-fy43/sup !y inf
lswrite

!*****
! CASO DE CARGA 4
!*****
!lsclear,all !borra cargas anteriores
asel,s,,47 !selecciona un area
nsla,s,1 !selecciona los nudos del area anterior
d,all,ux,0 !apoyo fijo
d,all,uy,0
d,all,uz,0
asel,all
nsl,all
sfa,47,1,pres,-fx14/sup !x izquierda
sfa,15,1,pres,-fx24/sup !x sup izq
sfa,20,1,pres,-fx34/sup !x sup der
sfa,30,1,pres,-fx44/sup !x derecha
sfa,25,1,pres,-fy14/sup !y sup
sfa,3,1,pres,-fy24/sup !y sup sup
sfa,10,1,pres,-fy34/sup !y inf sup
sfa,42,1,pres,-fy44/sup !y inf
lswrite
save
lssolve,1,4 !calcula por hipotesis
save
finish

!*****
!ENTRADA POSTPROCESO
!*****
/POST1
!/pnum,mat,0
SET,1 !caso de carga 1
!set,2 !caso de carga 2
!set,3 !caso de carga 3
!set,4 !caso de carga 4
SHELL,MID !tensiones en el medio
save
!/DSCALE,1,40 !amplia desplazamientos
plnsol,s,eqv !von misses

```

Se tantean en un principio espesores de 8, 10 y 12mm. Se muestran a continuación los resultados de los cálculos realizados en las diferentes hipótesis; una vez analizados con detalle los resultados obtenidos, se adopta el espesor de 10mm. como la opción de nudo de enlace inferior válida para la construcción de la malla espacial.

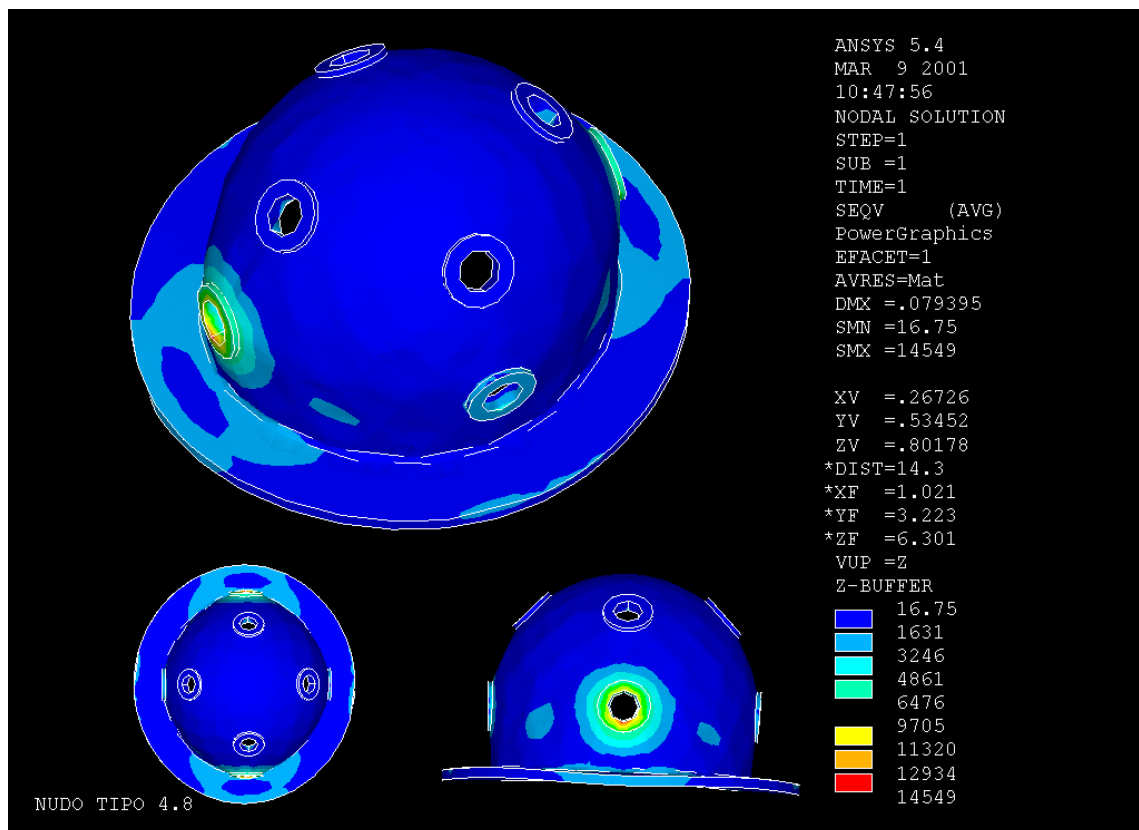


Ilustración III-16.- Nudo inferior. Espesor 8mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 1.

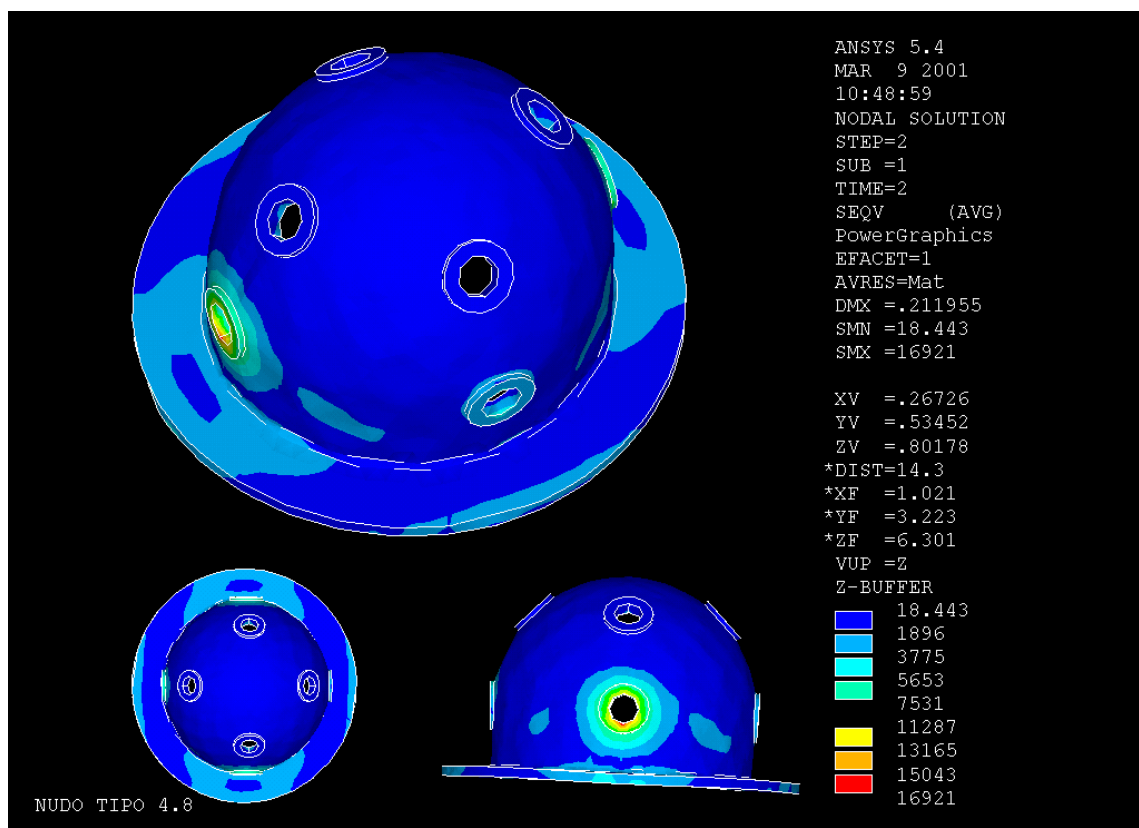


Ilustración III-17.- Nudo inferior. Espesor 8mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 2.

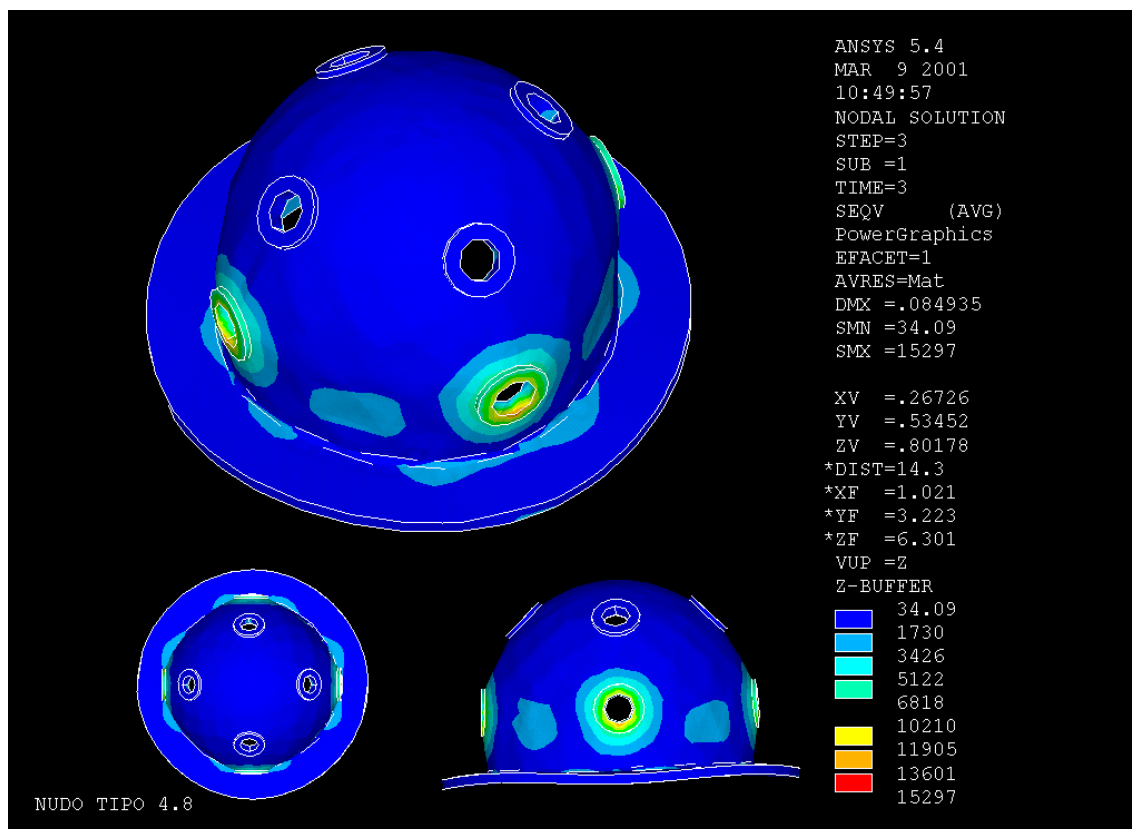


Ilustración III-18.- Nudo inferior. Espesor 8mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 3.

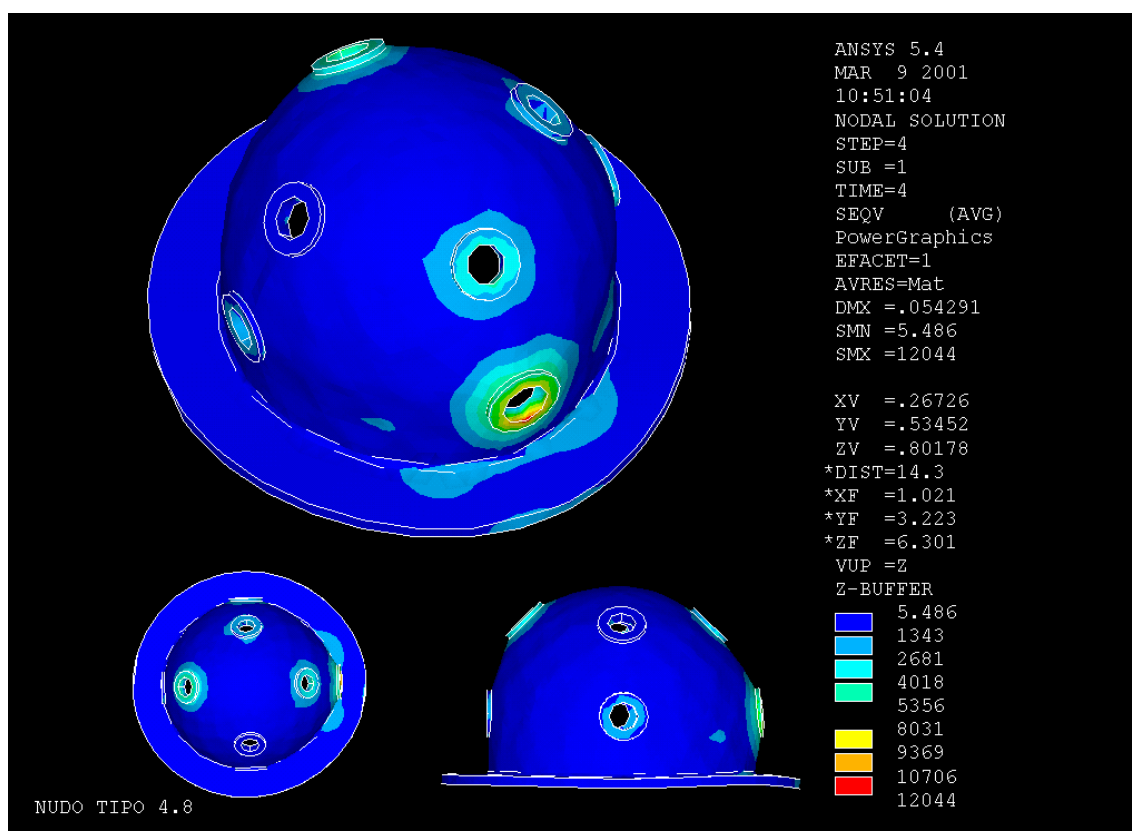


Ilustración III-19.- Nudo inferior. Espesor 8mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 4.

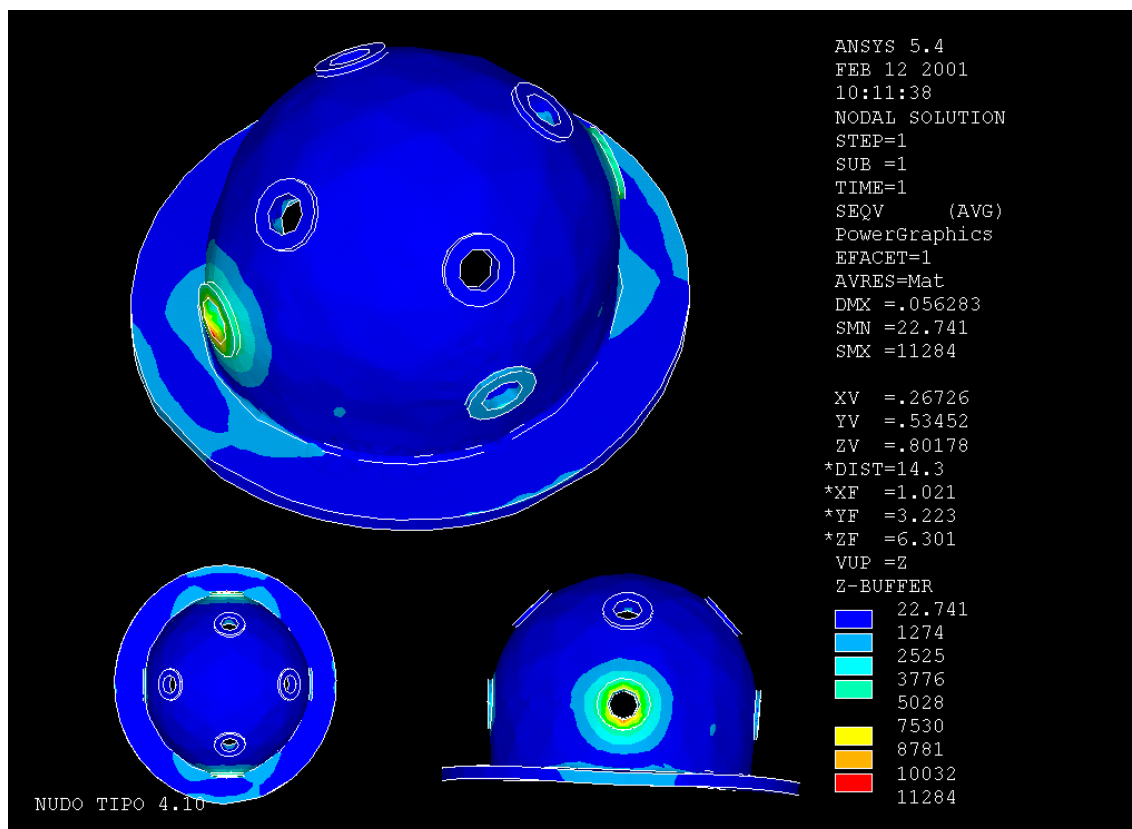


Ilustración III-20.- Nudo inferior. Espesor 10mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 1.

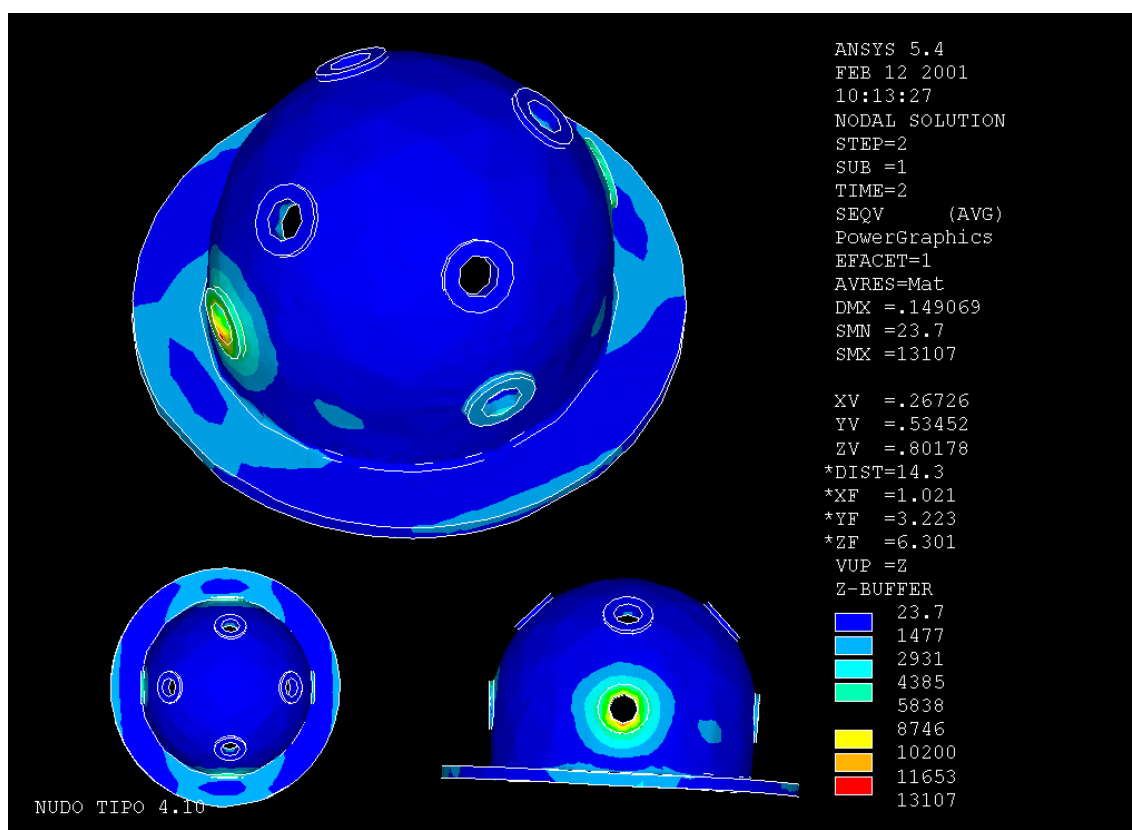


Ilustración III-21.- Nudo inferior. Espesor 10mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 2.

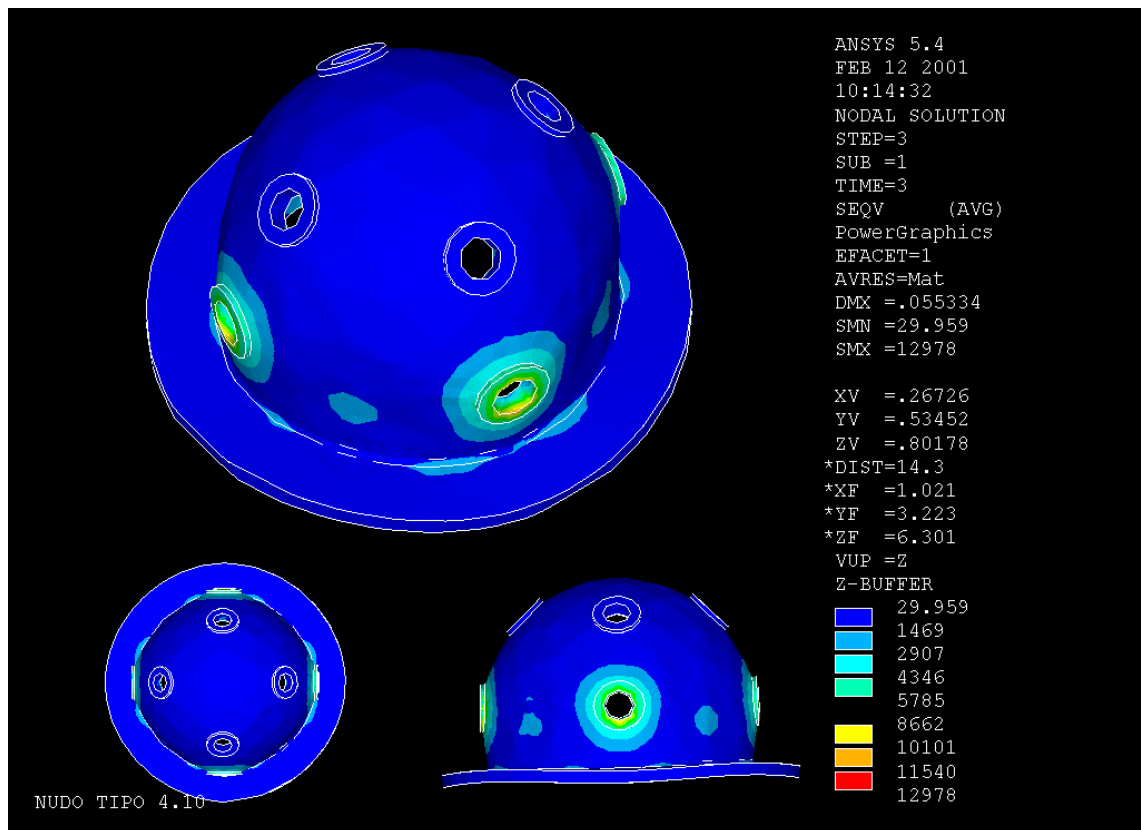


Ilustración III-22.- Nudo inferior. Espesor 10mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 3.

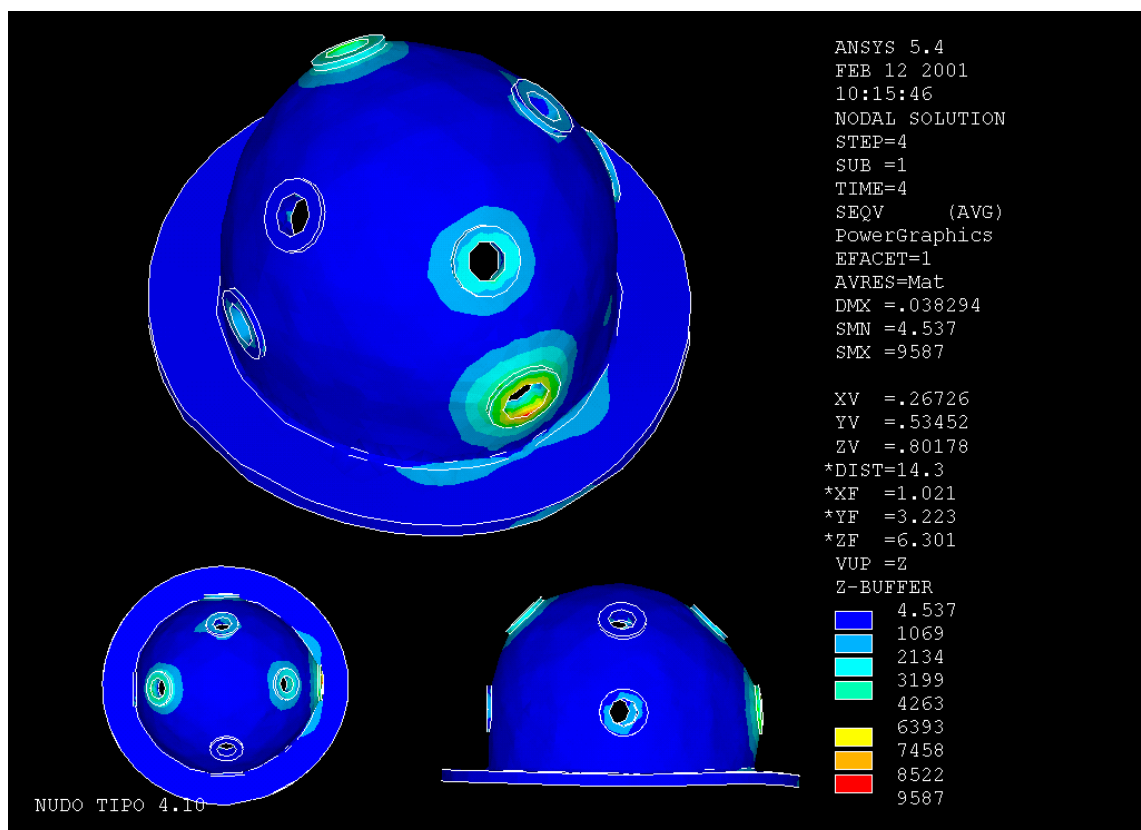


Ilustración III-23.- Nudo inferior. Espesor 10mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 4.

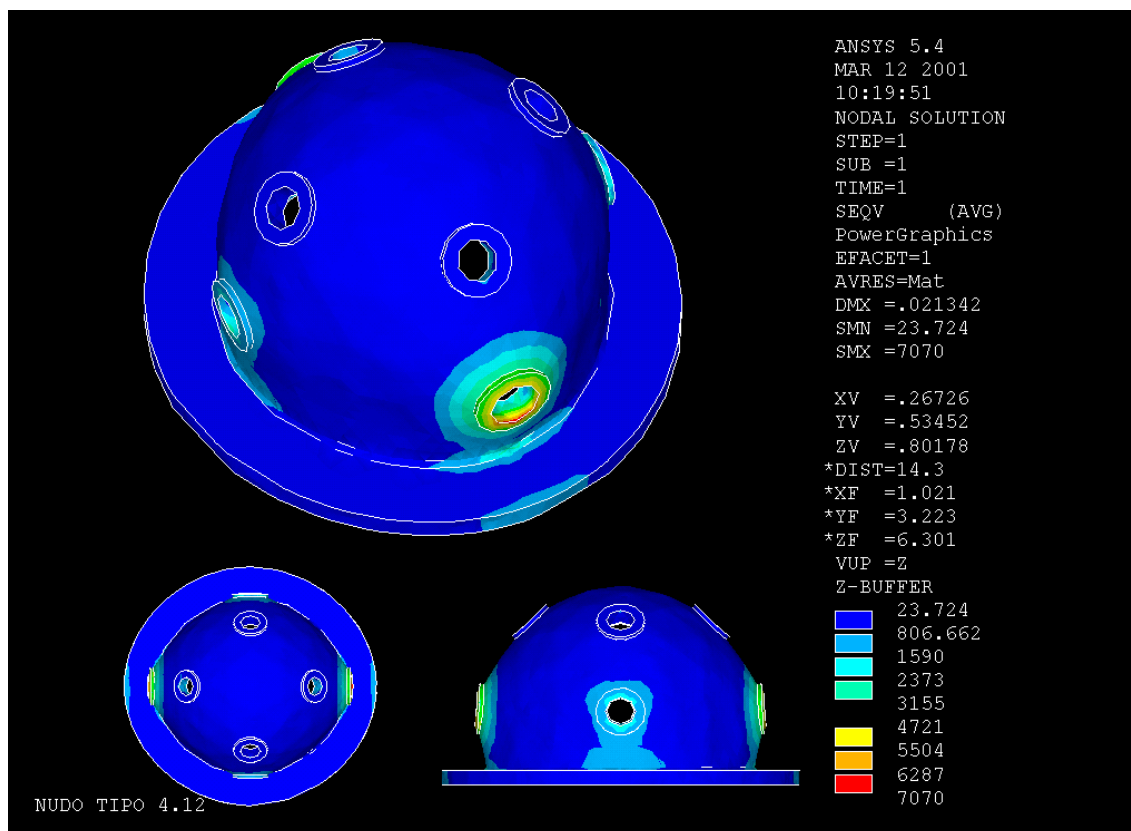


Ilustración III-24.- Nudo inferior. Espesor 12mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 1.

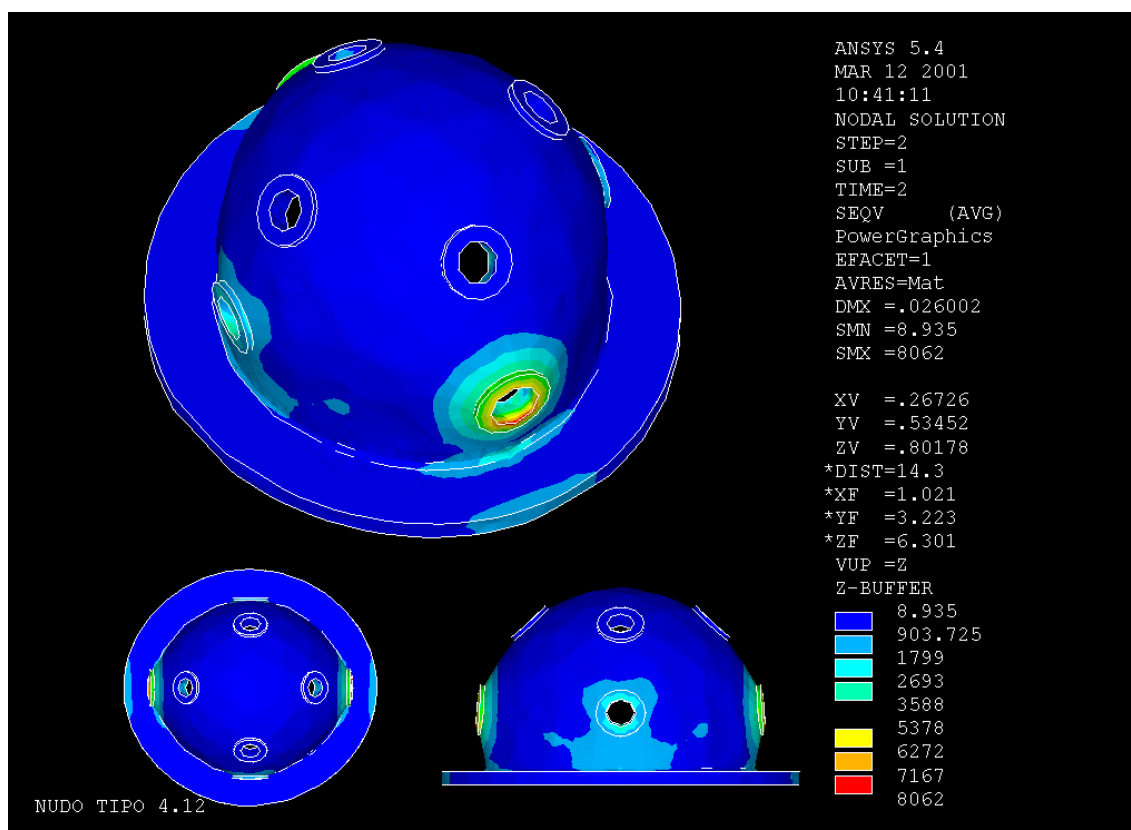


Ilustración III-25.- Nudo inferior. Espesor 12mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 2.

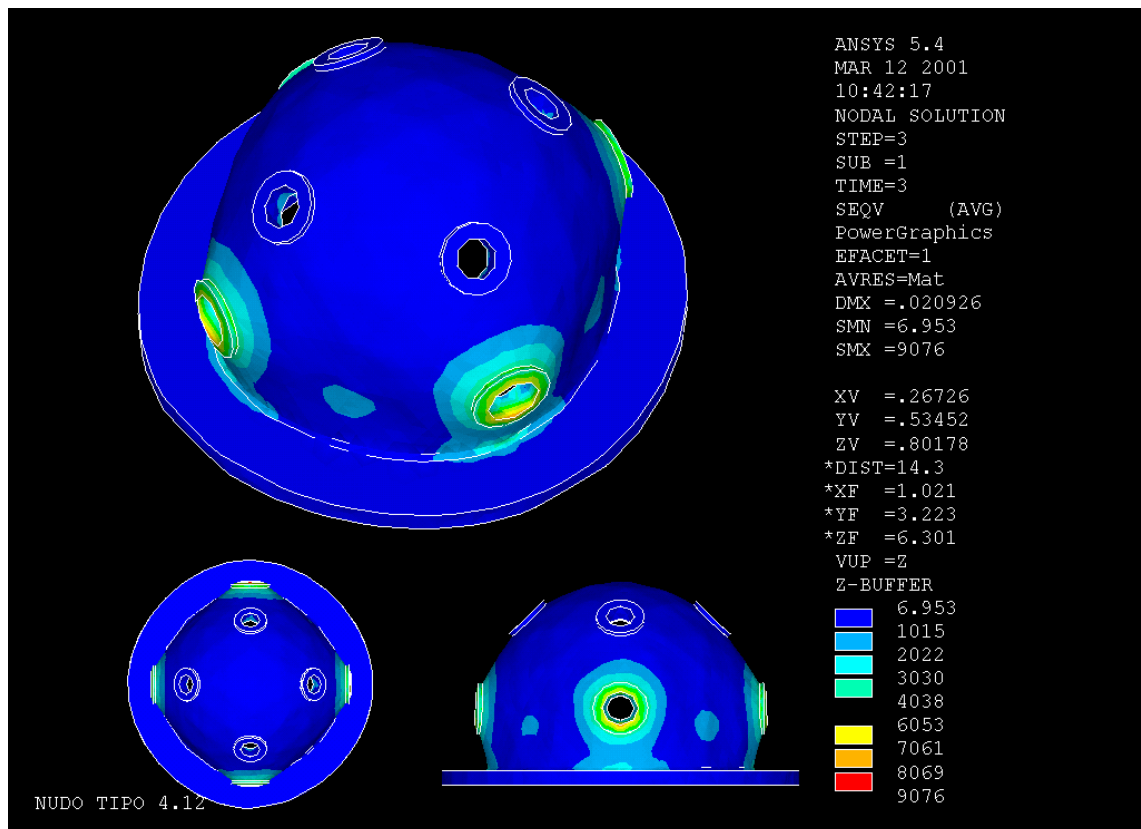


Ilustración III-26.- Nudo inferior. Espesor 12mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 3.

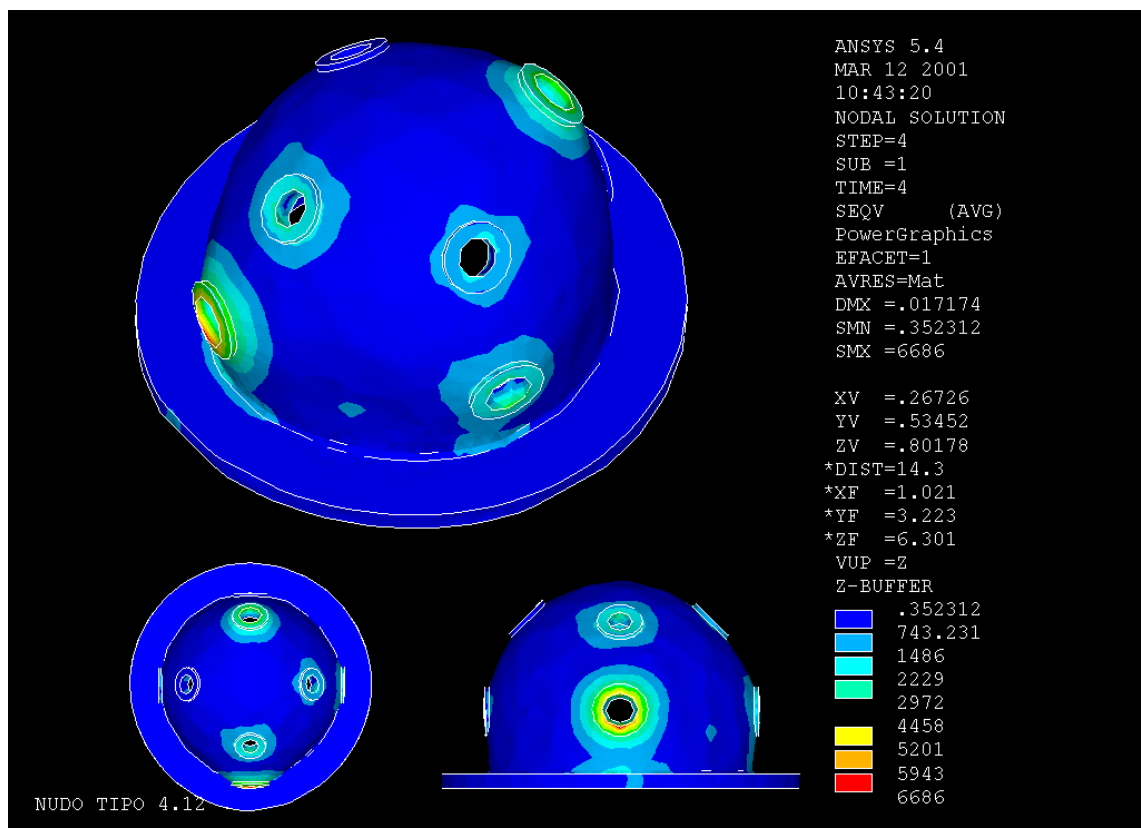


Ilustración III-27.- Nudo inferior. Espesor 12mm. Tensión equivalente. Hipótesis de carga 4.

IV.- CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTRUCTURA ESPACIAL.

1.- DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO ARQUITECTÓNICO

Por parte de la Universidad de A Coruña se encarga al equipo compuesto por el Dr. Arquitecto Fco. Javier Estévez Cimadevila y al arquitecto José Antonio Vázquez Rodríguez, director y redactor respectivamente de la presente tesis, la redacción del proyecto básico y de ejecución para la cubrición y acondicionamiento de una pista de tenis situada en el Campus de la Zapateira. Las pretensiones iniciales de la Universidad consistían en la construcción de una construcción abierta respetando el edificio de vestuarios anexo a la pista existente.

CAMPUS DA ZAPATEIRA

E. T. S.
ARQUITECTURA

DEPARTAMENTOS
E.T.S. ARQUITECTURA

E. U. ARQUITECTURA
TÉCNICA

FACULDADE DE
CIENCIAS

FACULDADE DE
CC. ECONÓMICAS
E EMPRESARIAIS

CASA DEL FRANCES

PISTAS POLIDEPORTIVAS

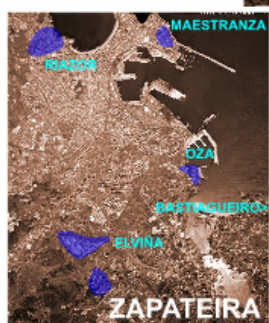


Ilustración IV-1.- Situación de la pista deportiva. Estado actual

El anteproyecto elaborado inicialmente planteaba la construcción de una malla espacial de módulos semioctaédricos apilables con diagonales paralelas a los bordes de la estructura, sustentando la malla sobre cuatro soportes constituidos por cuatro barras tubulares de acero que recogen los nudos de la capa inferior de la malla.

Se realizó un modelo virtual del proyecto utilizando para ello herramientas de generación automática de geometrías y modelado de sólidos, exportando más tarde la geometría tridimensional al entorno visual de 3ds max, donde aplicando determinadas propiedades de color, textura y transparencia a los objetos, junto con la disposición de fuentes de luz se generó un modelo virtual básico presentado a lo responsables de la Universidad para su valoración inicial; modelo que se muestra en la siguientes imágenes

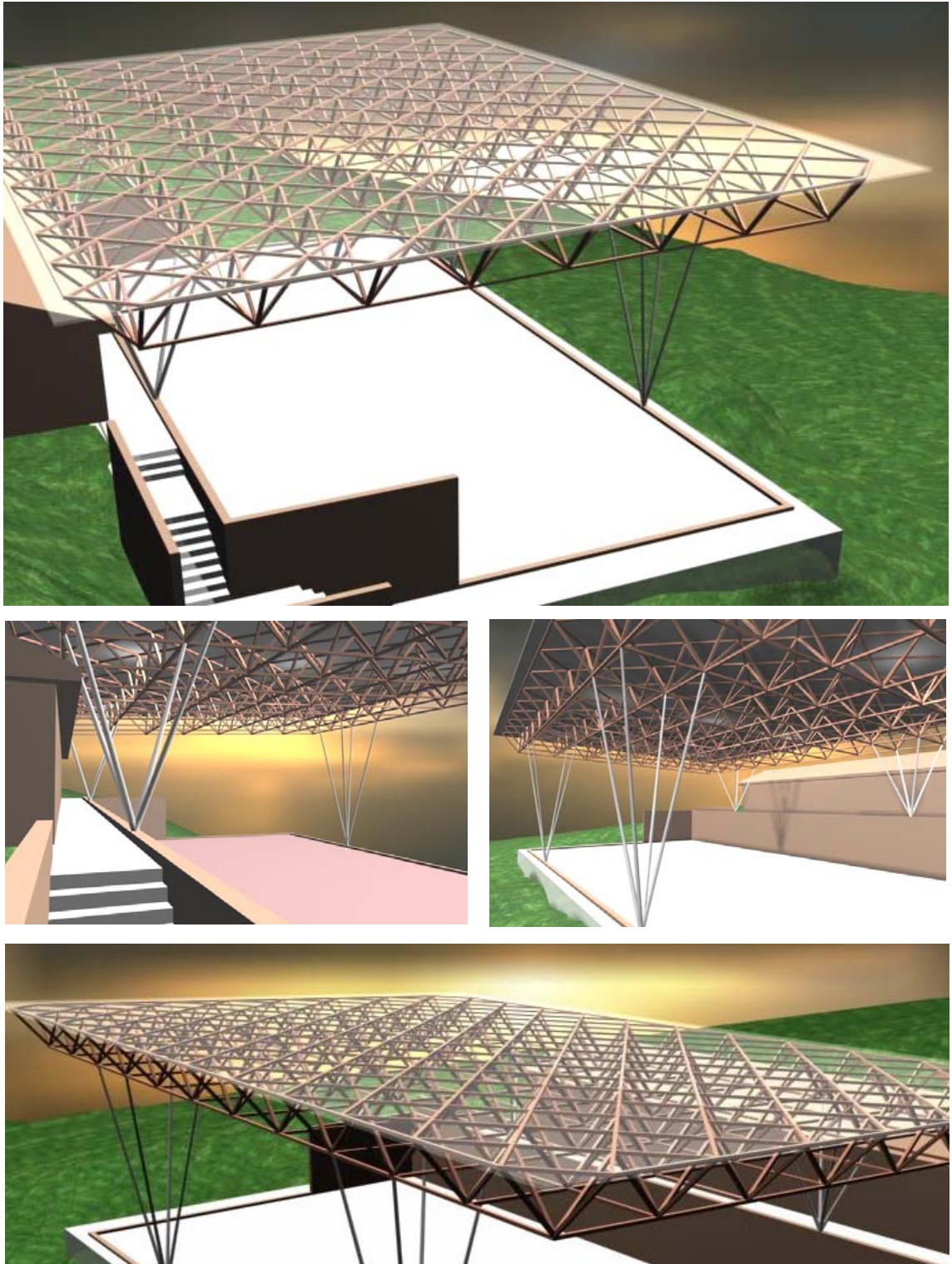


Ilustración IV-2.- Propuesta inicial para la cubrición de la pista deportiva.

A la vista de la potencialidad de la propuesta, la Universidad se plantea dotar al campus con un edificio con una mayor versatilidad de uso, de forma que pueda ser utilizado para la práctica de diferentes disciplinas deportivas e incluso como espacio de reunión para la celebración de actividades culturales universitarias; surge entonces la necesidad de realizar un cerramiento parcial de la pista por lo que la propuesta inicial queda invalidada ante el nuevo programa definido por la propiedad, al que habrá que dar una adecuada respuesta.

El escasísimo presupuesto para la ejecución del proyecto, condiciona los bocetos iniciales se plantea un elemento de cierre con una doble función, en primer lugar ha de proteger el espacio interior, y en segundo lugar ha de servir como soporte de la malla espacial.

El proyecto plantea un cerramiento constituido por muros perimetrales portantes de fábrica de ladrillo perforado “gresificado”, de 1 pie de espesor. La altura del muro llega a alcanzar los 9 metros con una longitud máxima de 41,75 metros por lo que para asegurar su estabilidad se debe procurar que su resistencia se fundamente en su forma, y no mediante la acumulación de material, se diseña entonces un muro que adopta la forma de múltiples paraboloides hiperbólicos enlazados obteniendo así la estabilidad necesaria ante las acciones horizontales de viento. La planta inferior del muro se diseña como una proyección de la estructura espacial de madera, alcanzando en su coronación una línea recta que sirve de apoyo a los nudos de la malla espacial.

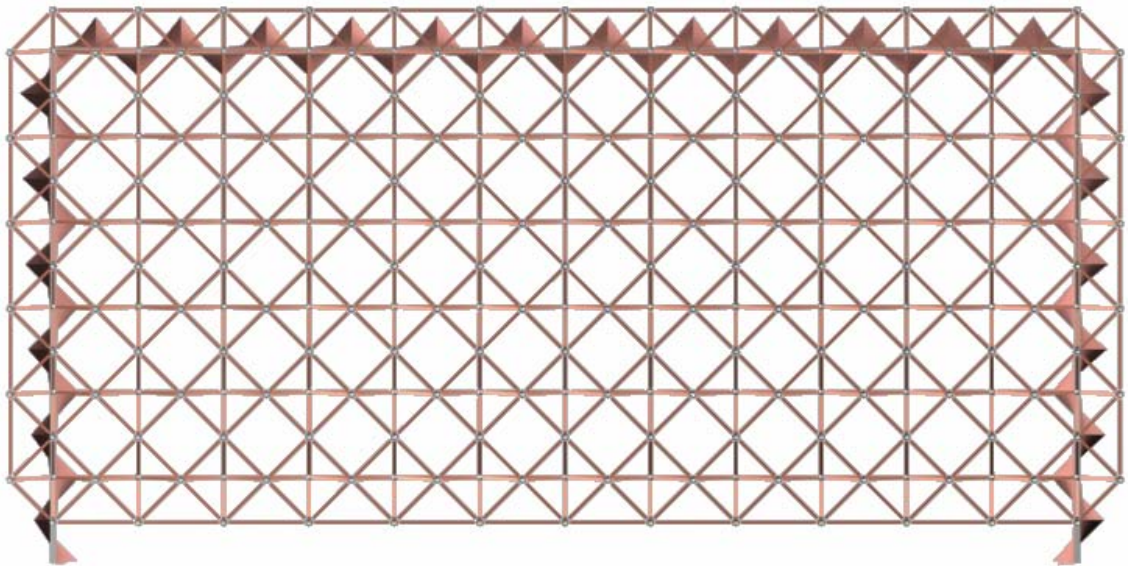


Ilustración IV-3.- Planta de la malla espacial.

Con la solución adoptada se produce un efecto favorable en el planteamiento general del proyecto, la malla espacial de madera pierde su protagonismo ante el fuerte carácter del elemento de cierre, obteniéndose de esta forma un equilibrio formal en el espacio arquitectónico creado; permite además, con un coste ajustado resolver el cerramiento, disponer de un apoyo continuo para la estructura de cubierta y al mismo tiempo dotar a la construcción de una expresividad formal que dignifica su impacto visual.

La estructura de cubierta se resuelve mediante una malla espacial con sus diagonales paralelas a los bordes, constituida por módulos semioctaédricos apilables de 2,45m de lado y 1,732m. de altura, cubriendo una superficie rectangular total de 46,04 m. x 21,79 m.

En la coronación del muro de fábrica se dispone una viga de encadenado de hormigón de 24cm. de ancho sobre la que apoyan tres de los lados de la malla, los apoyos se disponen cada dos módulos separados una distancia $d = 2 \cdot 2,45 \cdot \sqrt{2} = 6,93$ m. La vinculación de los apoyos de borde con la viga de encadenado se ha diseñado de forma que permita su desplazamiento perpendicular al muro con la finalidad de evitar la transmisión de empujes horizontales.

El apoyo del cuarto borde de la malla se realiza sobre cuatro soportes dobles en forma de V constituidos por barras tubulares huecas de sección cuadrada de 150mm. de lado y 30mm. de espesor, que se articulan sobre el muro de hormigón armado existente

La estructura se compone de 78 módulos semioctaédricos apilables; el número de barras en módulos es de 312 para la capa superior de 125mm. de lado y 25mm. de espesor, 312 barras para las diagonales, de las cuales 304 tienen 125mm. de lado y 25mm. de espesor, en tanto las ocho restantes son de 150mm. de lado y 30mm. de espesor. Todas las barras de los módulos, ejecutadas en madera laminada de abeto, clase resistente GL24h, tienen una dimensión estricta de 2000mm. La estructura se completa con 34 barras de cierre de capa superior de 3020mm. de longitud, 125mm. de lado y 25mm. de espesor y 137 barras de capa inferior con una longitud de 3020mm., de las cuales 77 de ellas tienen 125mm. de lado y 25mm. de espesor y las 60 restantes son de 150mm. de lado y 30mm. de espesor.

Se ha realizado una alta uniformización modular empleándose solo dos tipos de módulos; los módulos del tipo 1 están conformados por barras tubulares huecas de sección cuadrada de 125mm. de lado y 25mm. de espesor. El módulo de tipo 2 se diferencia del anterior en que una de sus diagonales, la de apoyo en los puntales, tiene una sección de 150mm. de lado y 30mm. de espesor. En la mayoría de los casos las barras están sobredimensionadas ya que sus dimensiones son las mínimas razonables desde un punto de vista constructivo

El enlace de extremo de barra con el nudo metálico se realiza a través de un vástago metálico roscado de acero A8.8t, de diámetro 24 o 27mm. según los casos, rematado con una chapa metálica cuadrada de dimensiones iguales al hueco interior de la barra. El vástago se aloja dentro de un taco macizo de madera frondosa de alta densidad (Elondo) y se ancla a él mediante resina epoxi de dos componentes y baja viscosidad Sikadur 52 Inyección.

Las barras de la malla espacial se ensamblan a través de nudos metálicos realizados en acero A52b. La solución empleada, cuya idoneidad ha quedado reflejada con detalle en el capítulo anterior, consiste en una semiesfera enlazada a un aro cilíndrico rematado con una aleta de borde que rigidiza el nudo. Este diseño se emplea en los nudos de la capa inferior y en los nudos de borde de la capa superior. Los restantes nudos de la capa superior son básicamente iguales, si bien están subdivididos en dos mitades idénticas con unas bridas laterales de remate que sirven para el enlace directo entre módulos. El conjunto se complementa con el diseño de las piezas de apoyo, tal y como puede verse en la ilustraciones que se acompañan en el presente capítulo

La cubrición se resuelve con una solución fonoabsorbente constituida por una primera chapa perforada prelacada tipo PL-75/320 de Aceralia de 0.6 mm. de espesor dispuesta paralelamente a los bordes largos y sustentada en perfiles "Ω" OF-80/2.5 que apoyan en los nudos de la malla y discurren superpuestos a las barras del cordón superior. Sobre la primera chapa se dispone la chapa prelacada de remate de 0.6 mm. de espesor tipo PL-30/209 intercalando entre ambas un núcleo aislante de lana mineral de roca.

Se muestran en las siguientes ilustraciones la documentación gráfica del proyecto de cubrición de la pista polideportiva.

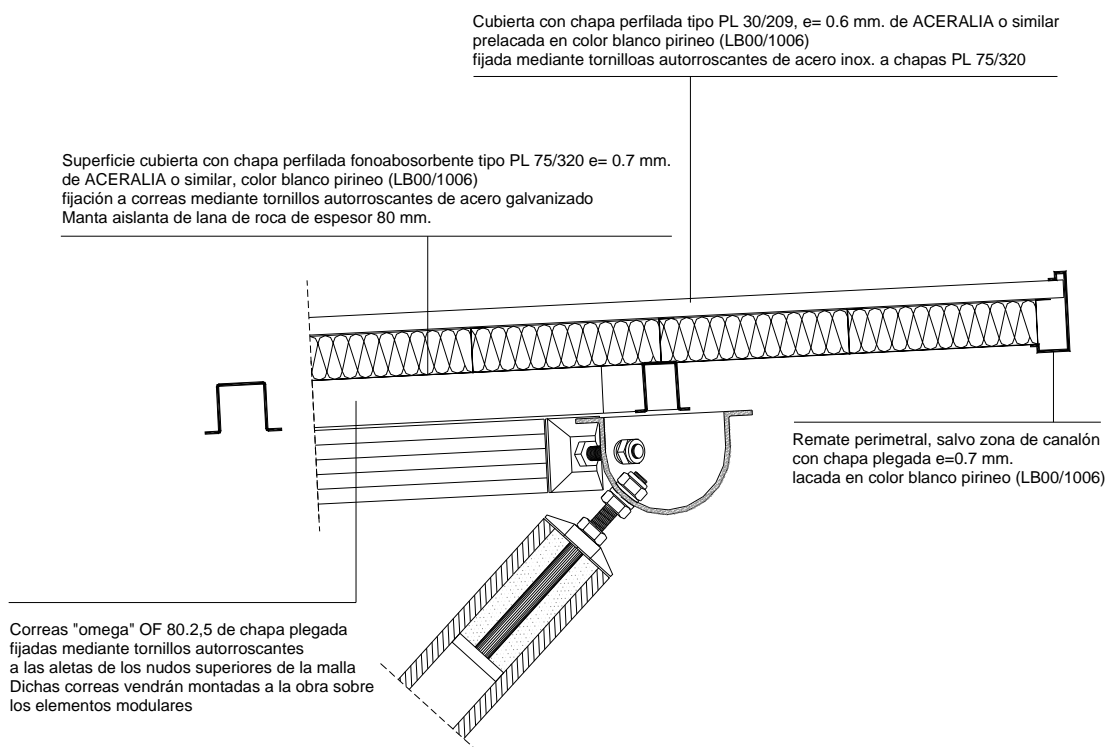


Ilustración IV-4.- Detalle constructivo de la cubierta



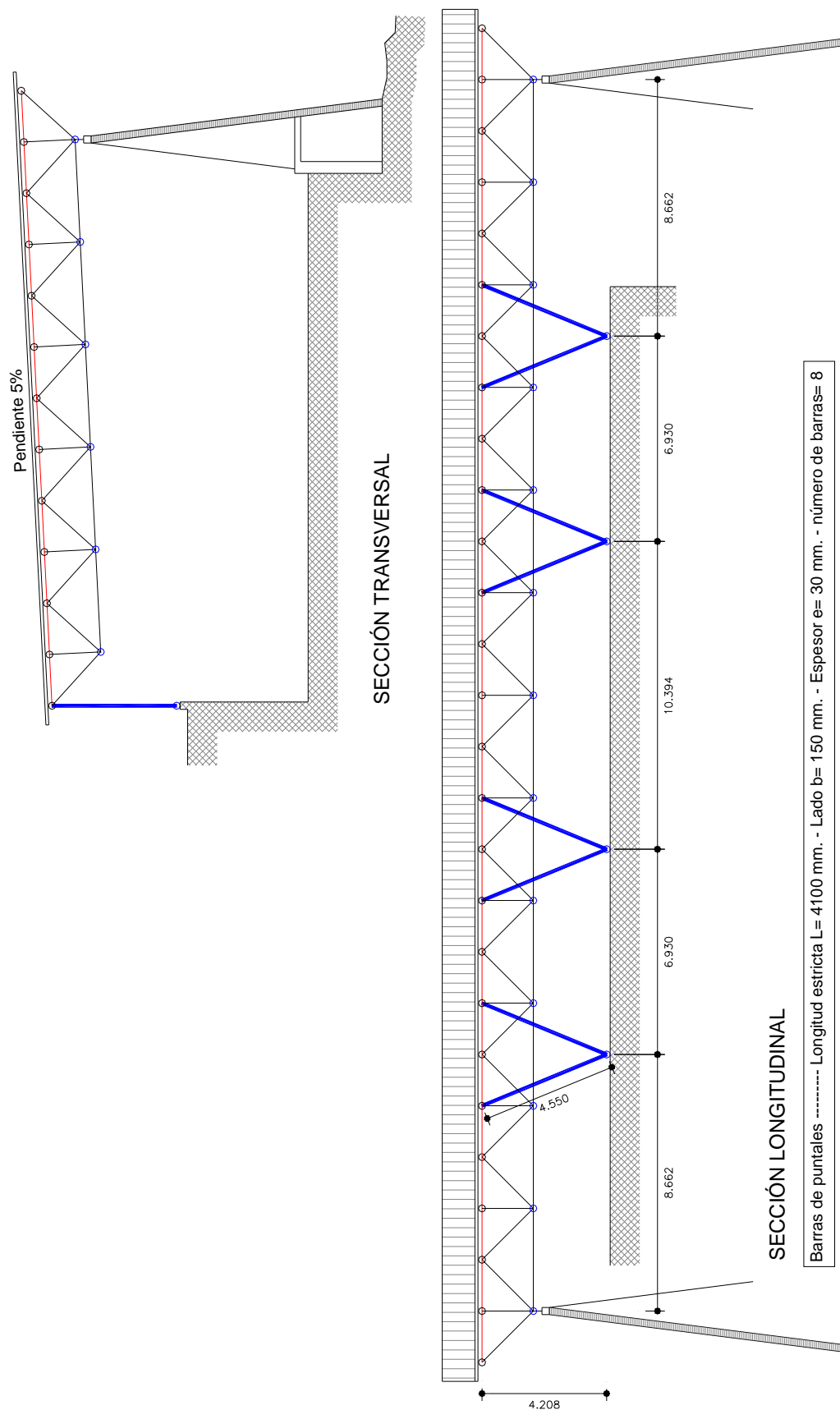


Ilustración IV-6.- Secciones

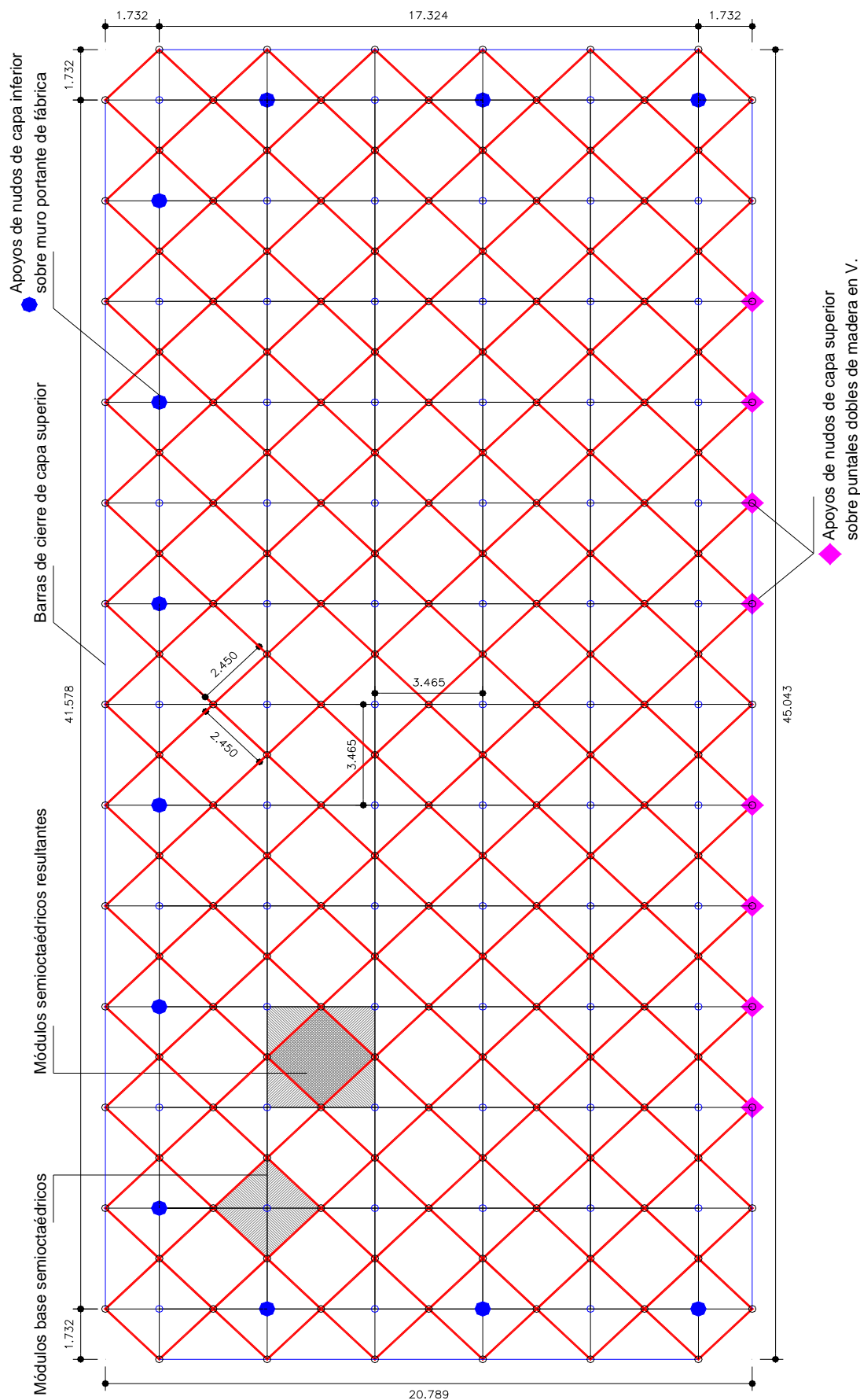


Ilustración IV-7.- Geometría de la malla espacial

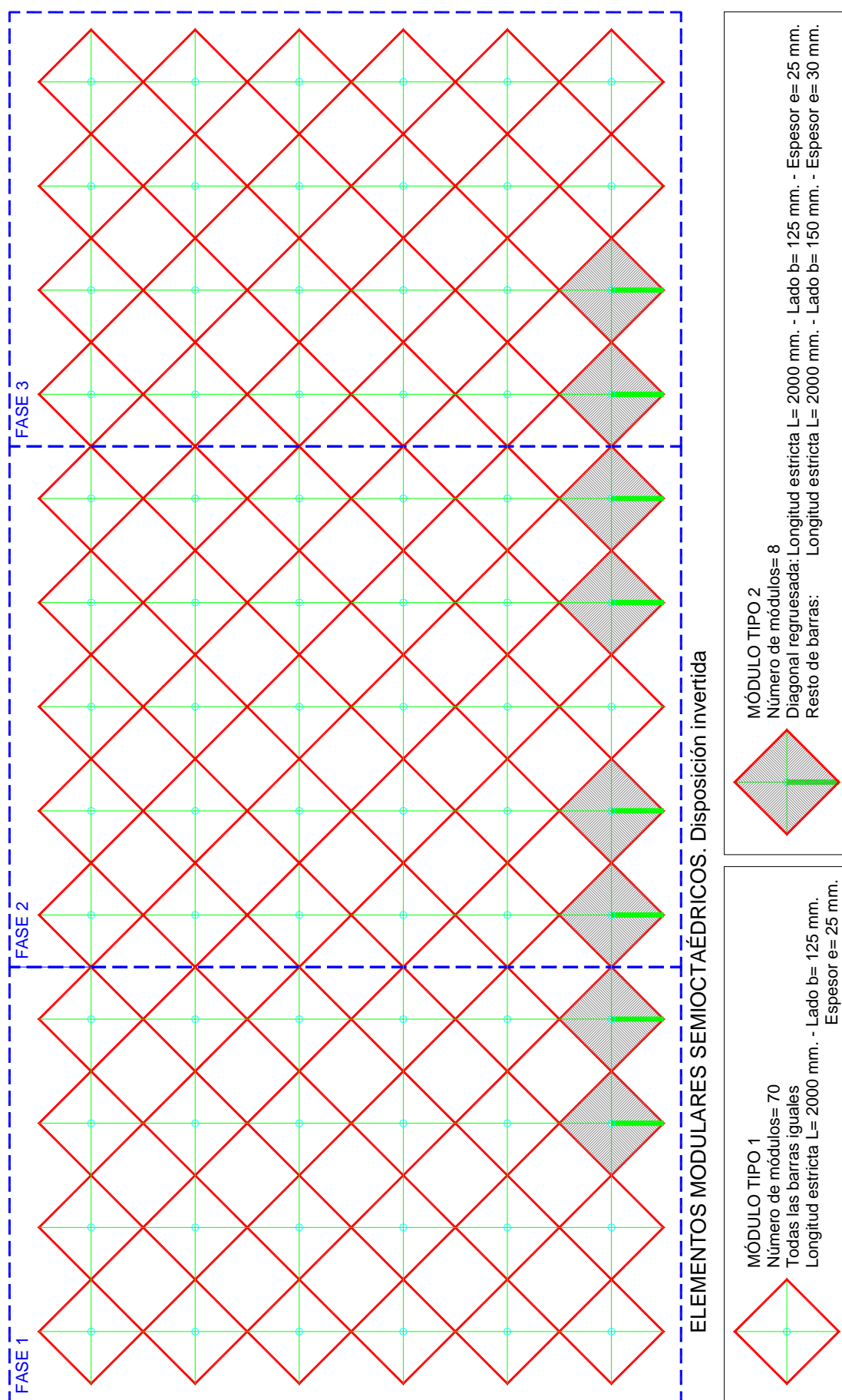


Ilustración IV-8.- Fases de montaje e izado de la malla

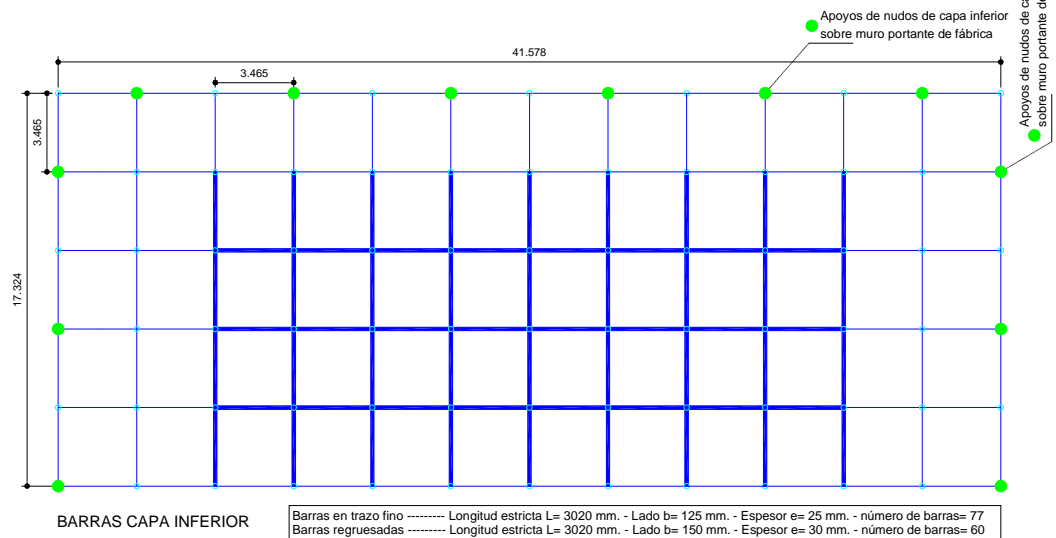
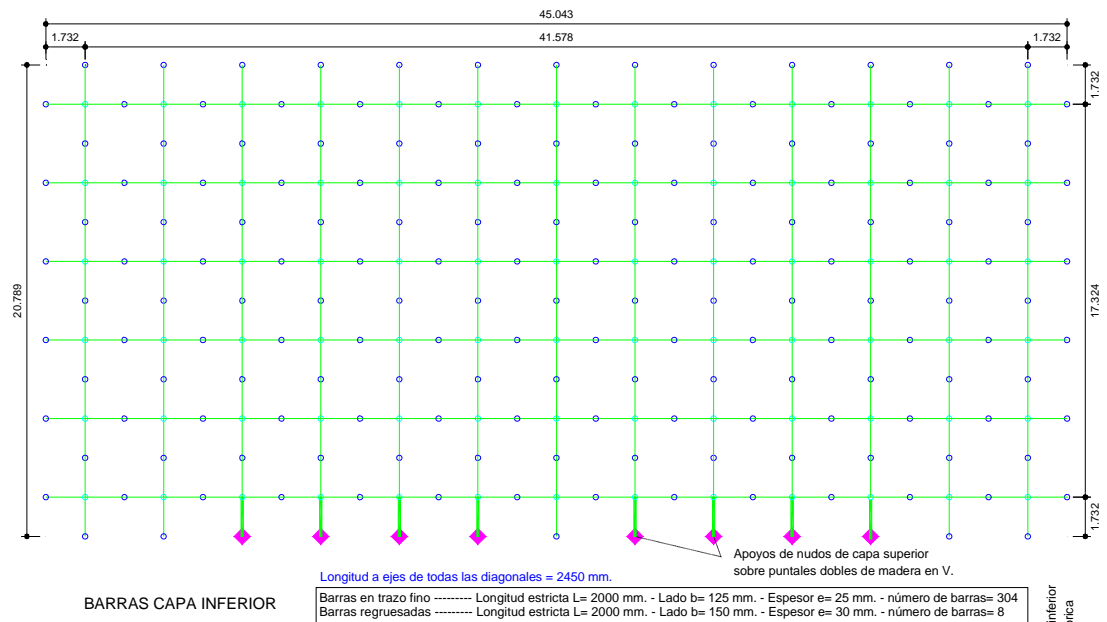
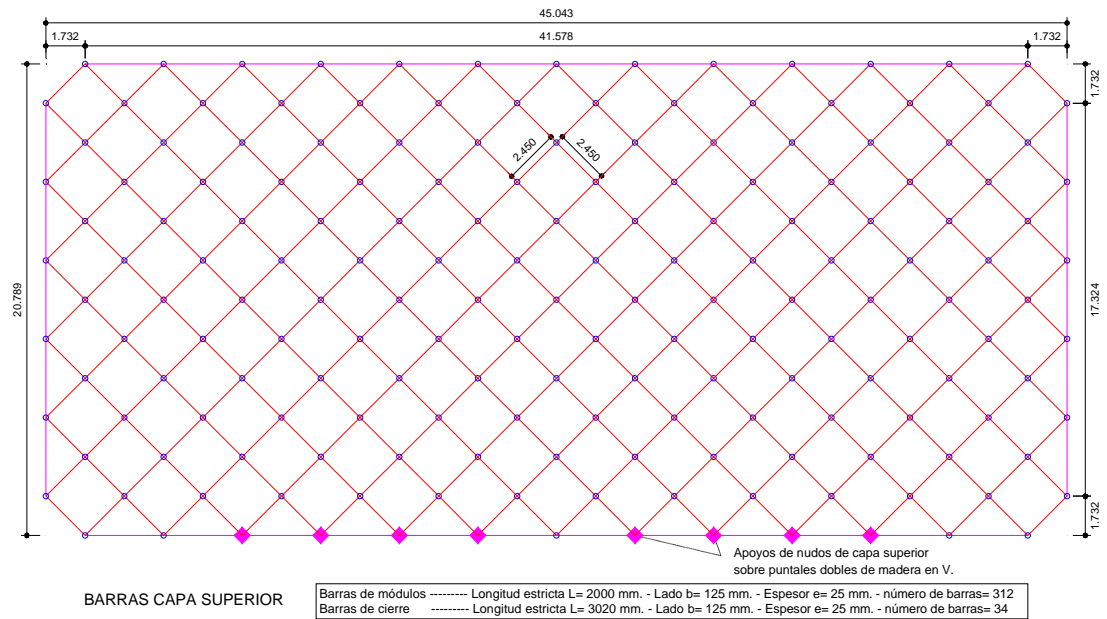
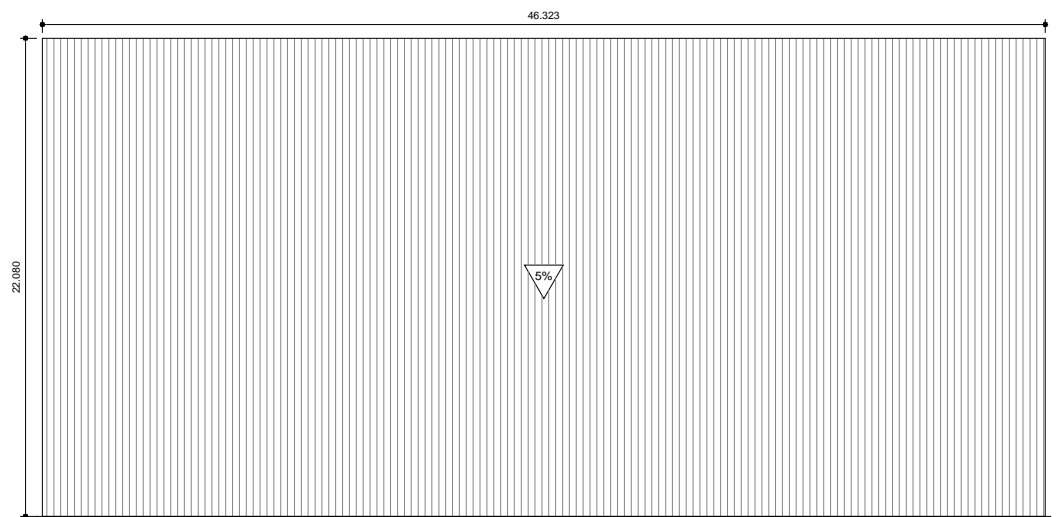
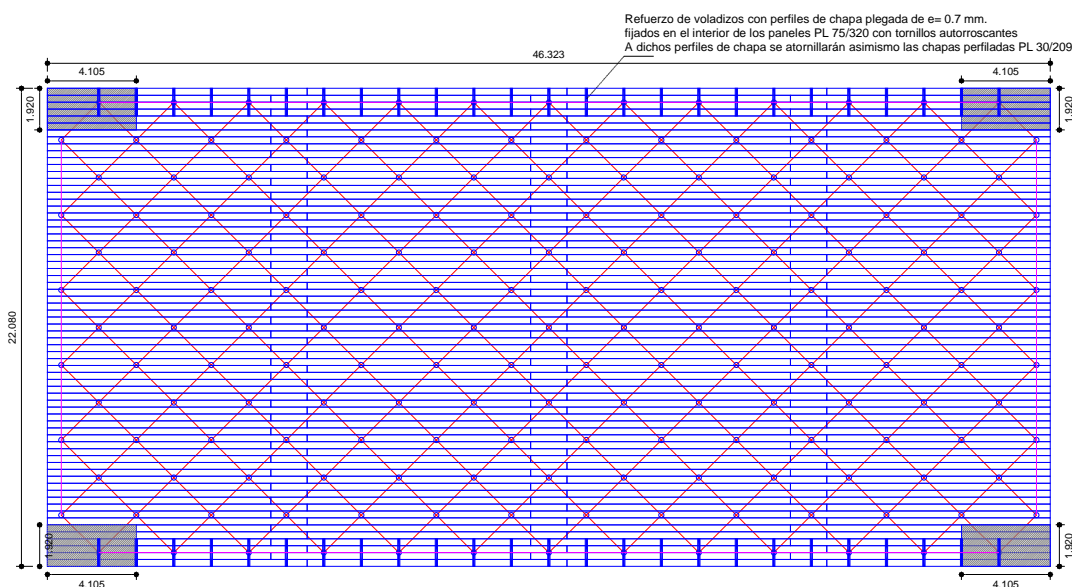


Ilustración IV-9.- Distribución de barras por capa



PLANTA DE CUBIERTA

Cubierta con chapa perfilada tipo PL 30/209, e= 0.6 mm. de ACERALIA o similar
prelacada en color blanco pino (LB00/1006)
fijada mediante tornillos autorroscantes de acero inox. a chapas PL 75/320
Canalón de sección rectangular y caída libre en chapa prelacada color blanco pino

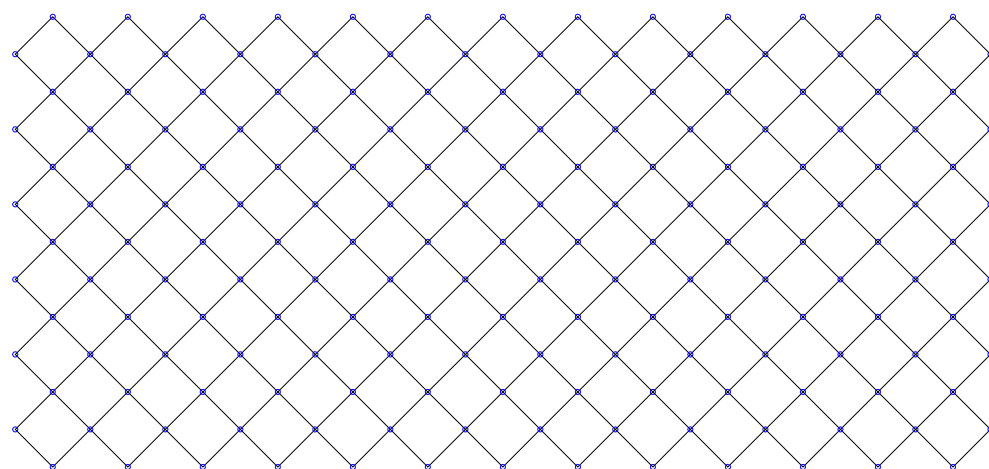


PLANTA DE CHAPA INTERIOR

Superficie cubierta con chapa perfilada fonosorbente tipo PL 75/320 e= 0.7 mm.
de ACERALIA o similar, color blanco pino (LB00/1006)
fijación a correas mediante tornillos autorroscantes de acero galvanizado
Manta aislante de lana de roca de espesor 80 mm.

Refuerzo de voladizos con perfiles de chapa plegada de e= 0.7 mm.
fijados en el interior de los paneles PL 75/320 con tornillos autorroscantes
A dichos perfiles de chapa se atornillarán asimismo las chapas perfiladas PL 30/209

Zona de refuerzo de voladizos
con chapa superior de 0.7 mm.
fijada a paneles PL 75/320
mediante tornillos autorroscantes



PLANTA DE CORREAS

Correas "omega" OF 80.2.5 de chapa plegada
fijadas mediante tornillos autorroscantes
a las aletas de los nudos superiores de la malla
Dichas correas vendrán montadas a la obra sobre
los elementos modulares

Ilustración IV-10.- Planta de cubierta

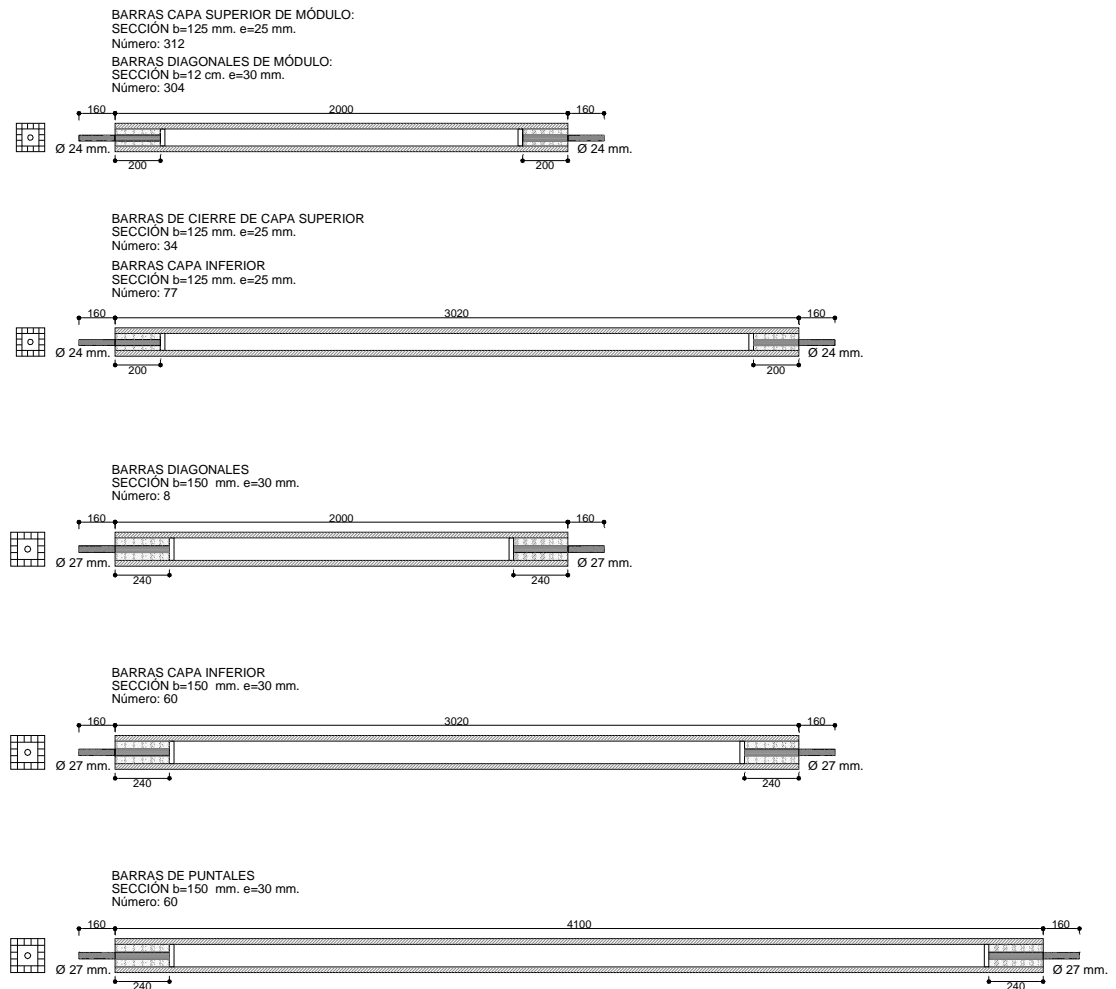


Ilustración IV-11.- Barras utilizadas en la malla espacial

Chapa de remate troncopiramidal acero A42b
Dimensiones 125x125 mm. espesor mínimo=5 mm. espesor máximo= 25 mm.
Dimensiones 150x150 mm. espesor mínimo=5 mm. espesor máximo= 25 mm.

Neopreno e= 3 mm.

Taco de madera maciza de la misma especie y clase resistente
Dimensiones 200x75x75 en barras de lado L= 125 mm.
Dimensiones 240x90x90 en barras de lado L= 150 mm.

Vástago metálico acero A8.8
Diámetro 24 mm. en barras de lado L= 125 mm.
Diámetro 27 mm. en barras de lado L= 150 mm.

Chapa de remate del vástago A42b
Dimensiones 75x75x20 mm. en barras de lado L= 125 mm.
Dimensiones 90x90x30 mm. en barras de lado L= 150 mm.

Paredes de la barra hueca de espesor
25 mm. en barras de lado L= 125 mm.
30 mm. en barras de lado L= 150 mm.

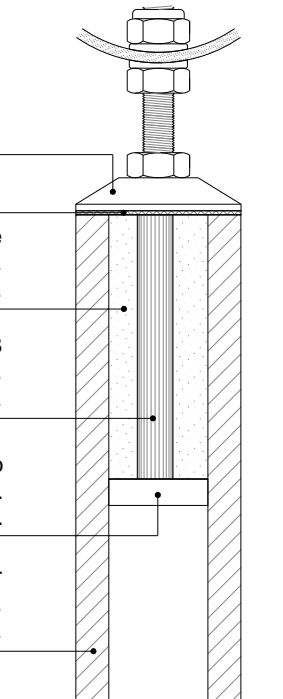
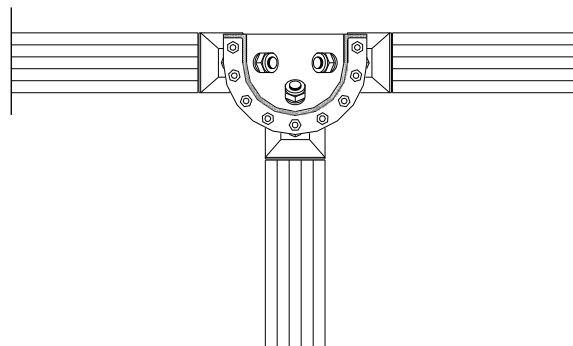
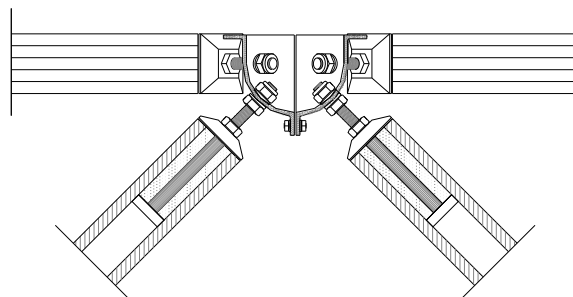


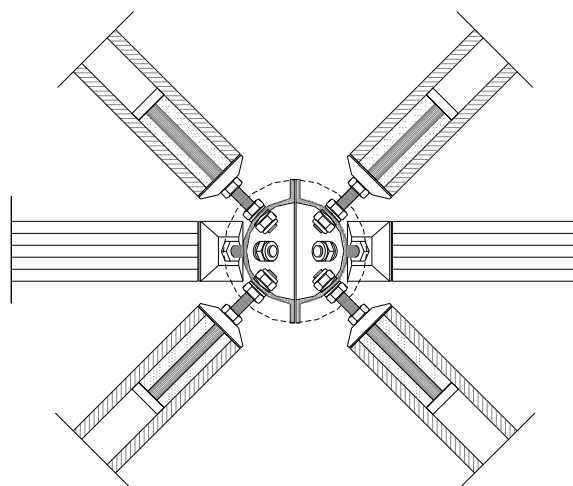
Ilustración IV-12.- Detalle de enlace extremo de barra



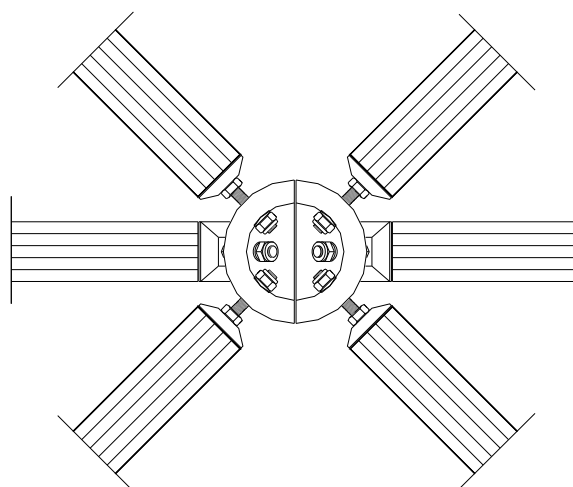
SECCIÓN TRANSVERSAL NUDO SUPERIOR DE MALLA



SECCIÓN LONGITUDINAL NUDO SUPERIOR DE MALLA



SECCIÓN HORIZONTAL NUDO SUPERIOR DE MALLA



PLANTA NUDO SUPERIOR DE MALLA

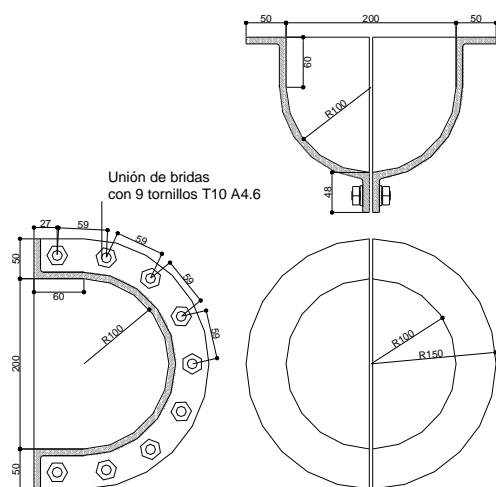
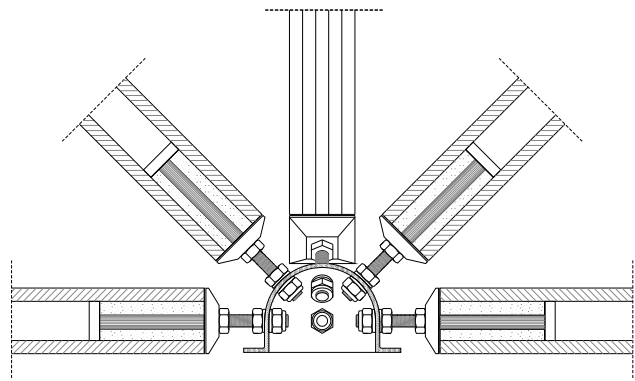
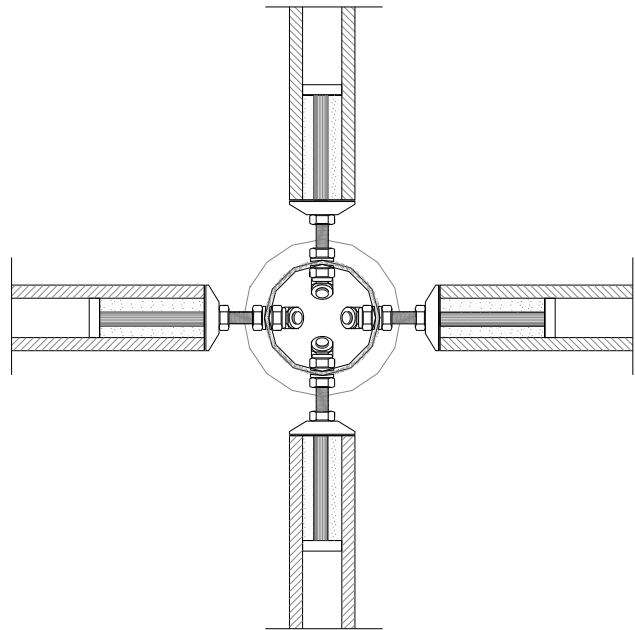


Ilustración IV-13.- Detalle del nudo de capa superior



SECCIÓN VERTICAL NUDO INFERIOR DE MALLA



SECCIÓN HORIZONTAL NUDO INFERIOR DE MALLA
Vista inferior

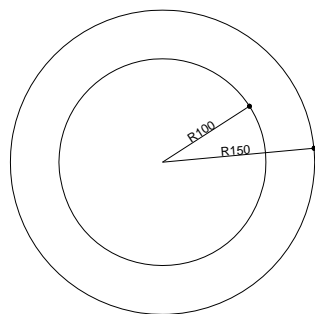
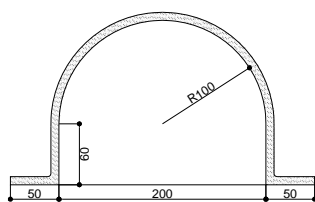
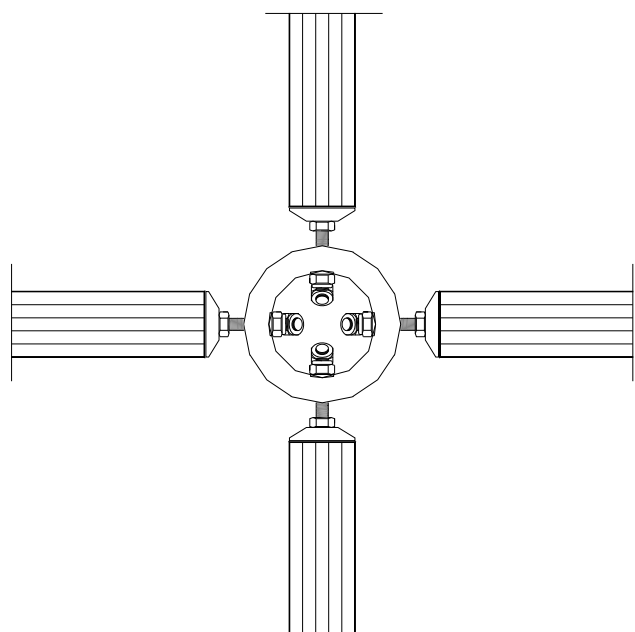


Ilustración IV-13.- Detalle del nudo de capa inferior



PLANTA NUDO INFERIOR DE MALLA
Vista inferior

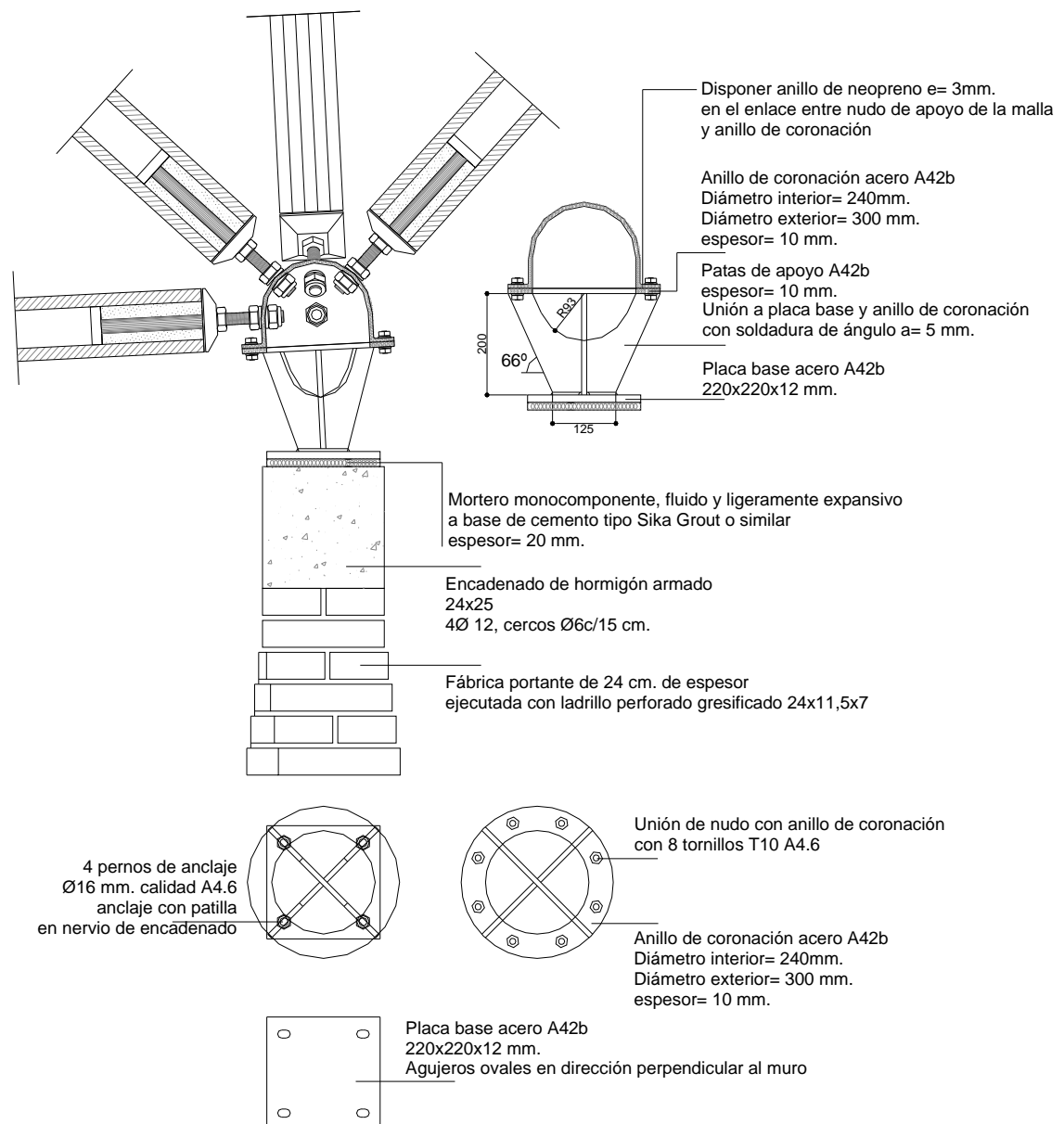
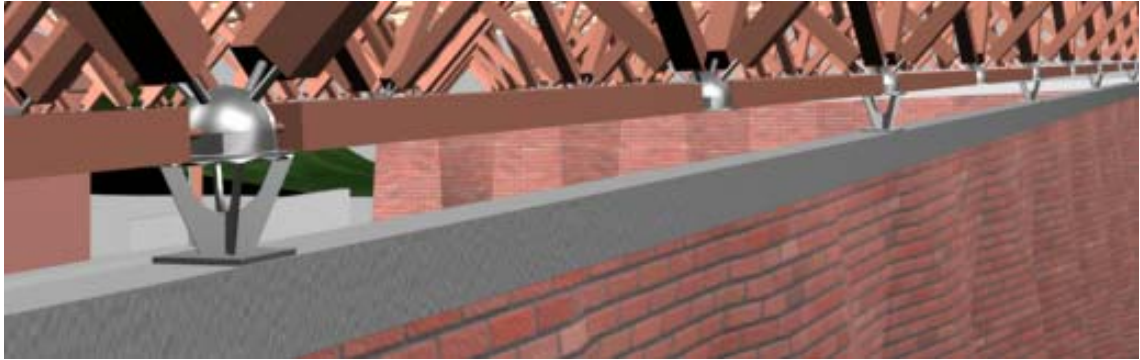


Ilustración IV-14.- Detalle de apoyo en coronación de muro

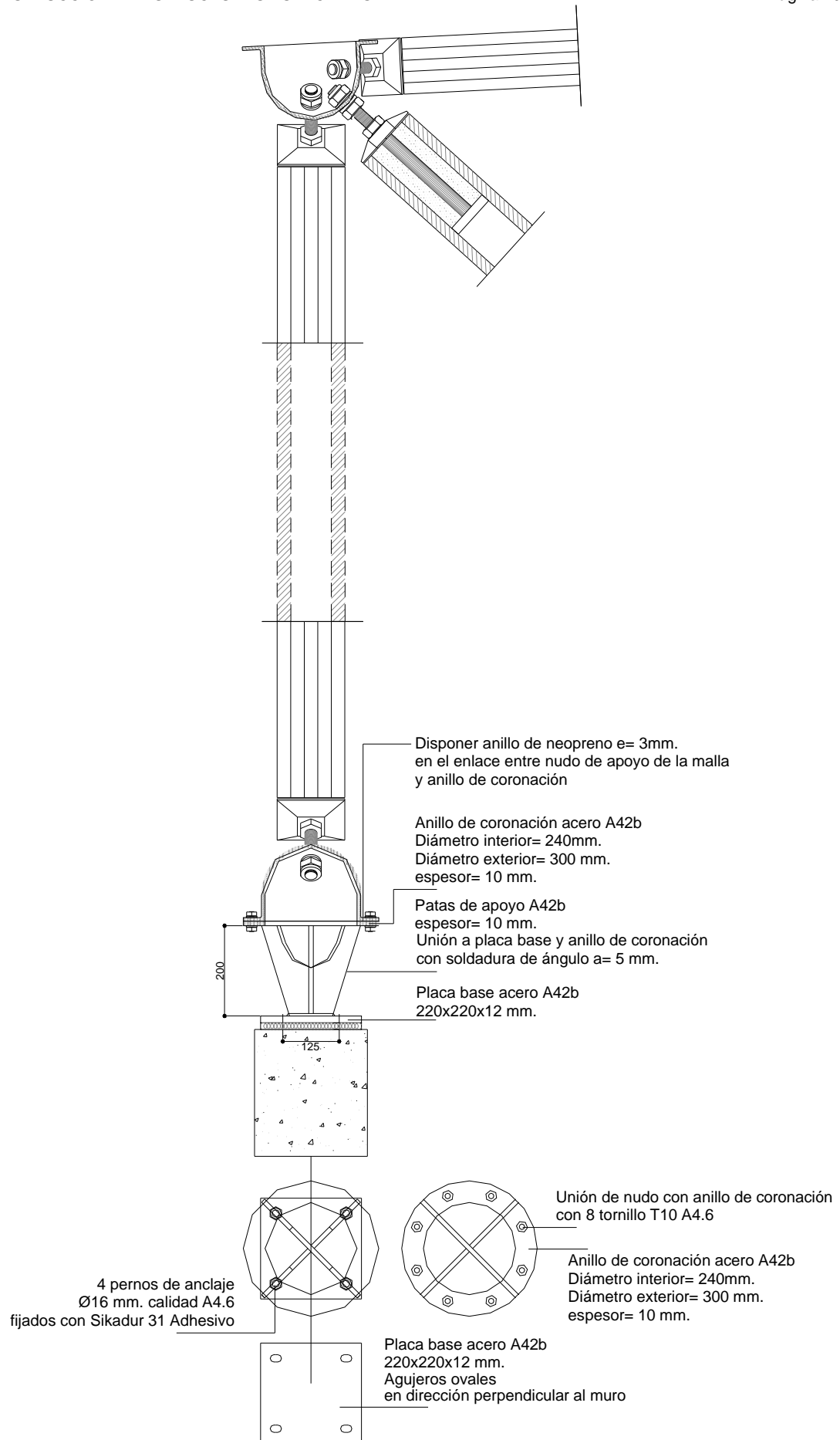


Ilustración IV-15.- Detalle de apoyo de puntales sobre el muro de hormigón existente

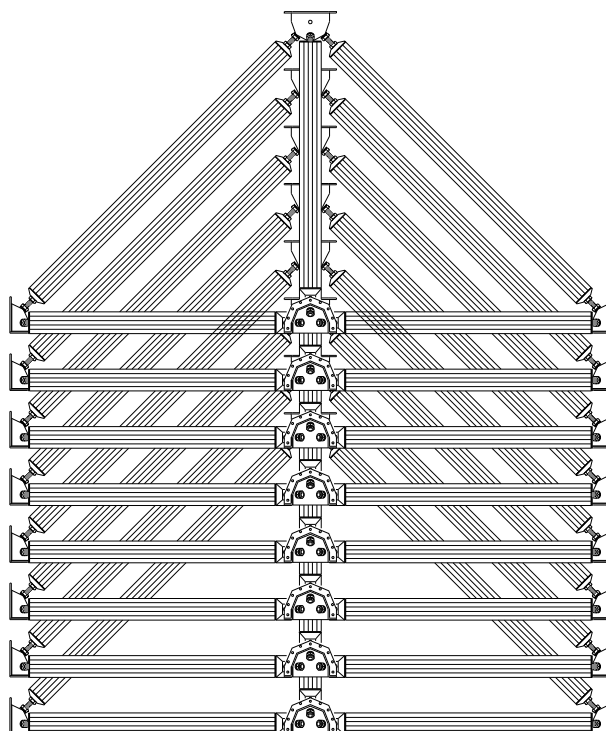
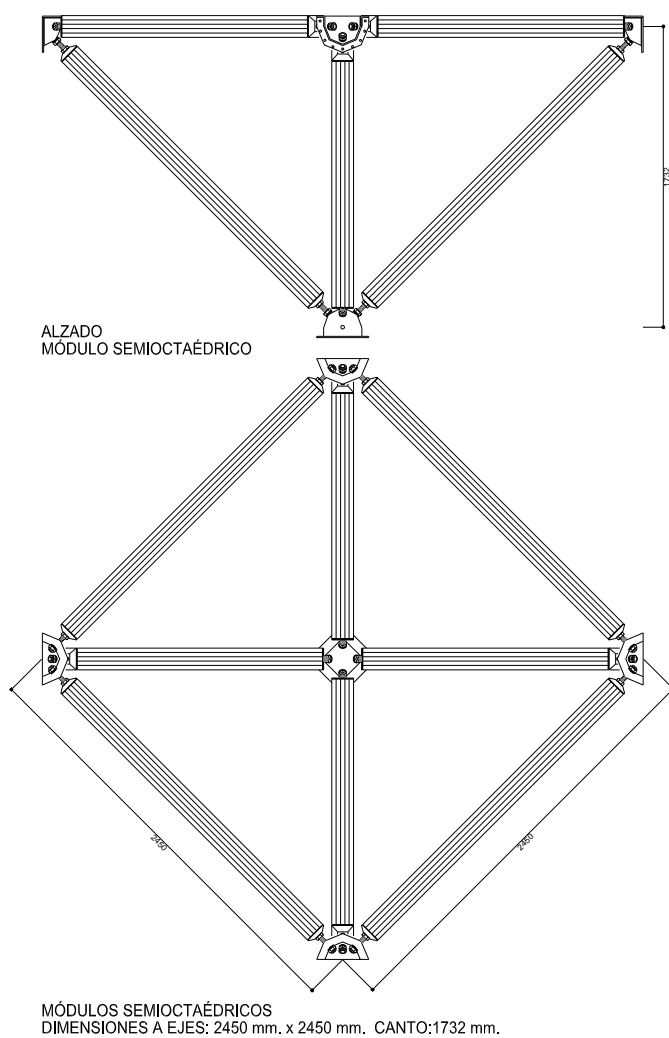


Ilustración IV-16.- Detalle del módulo apilable

MÓDULOS SEMIOCTAÉDRICOS APILADOS

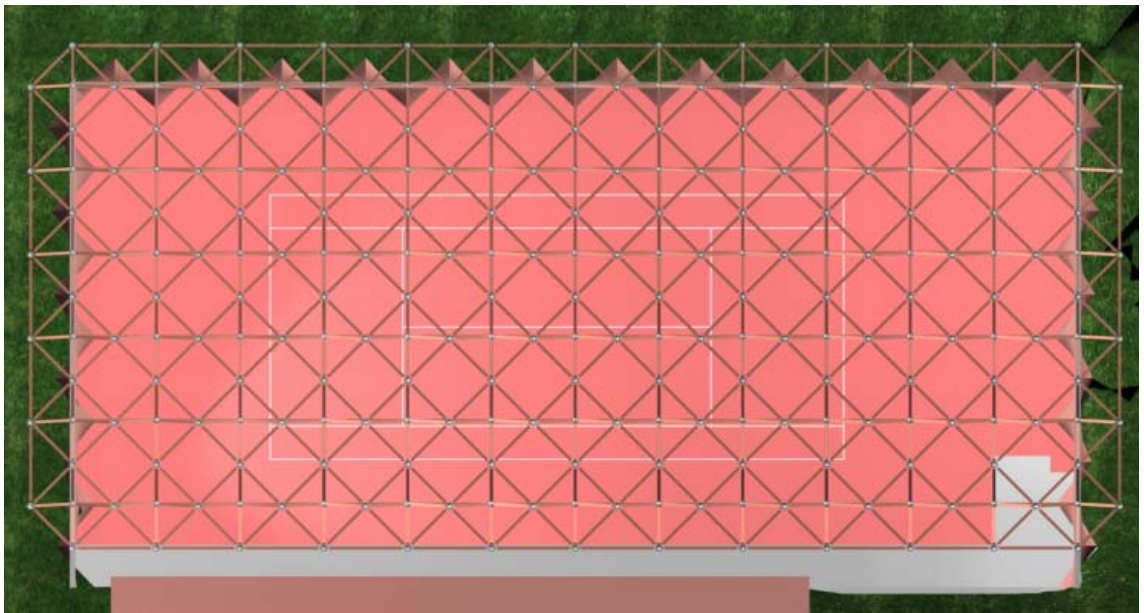


Ilustración IV-17.- Vista cenital de la malla.

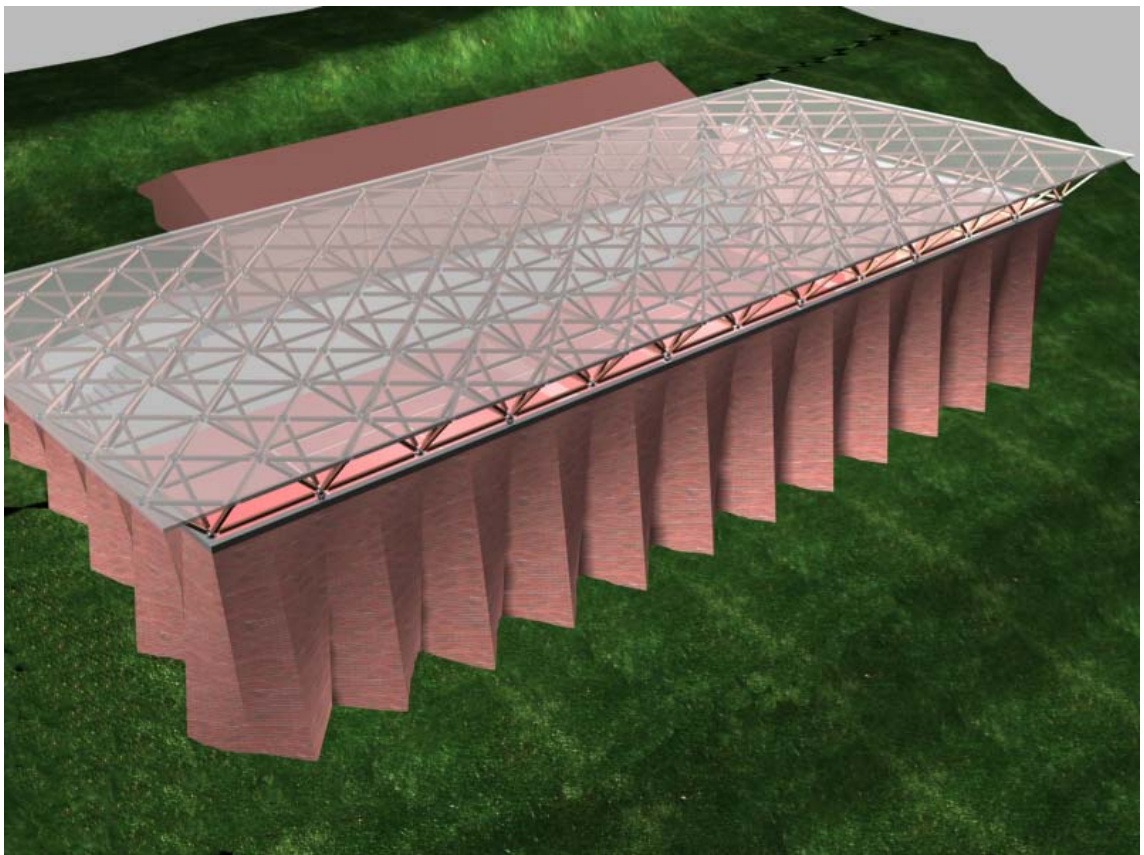


Ilustración IV-18.- Vista exterior.

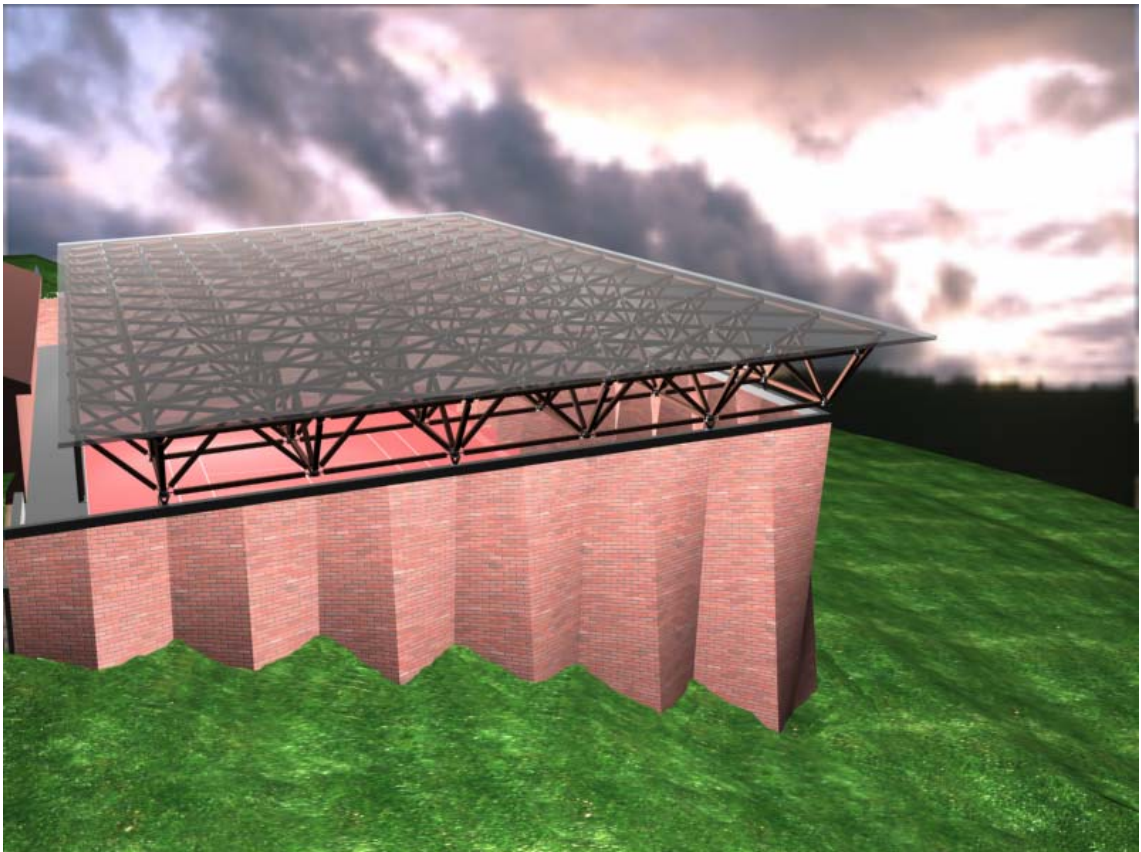


Ilustración IV-19.- Vista lateral



Ilustración IV-20.- Alzado Frontal

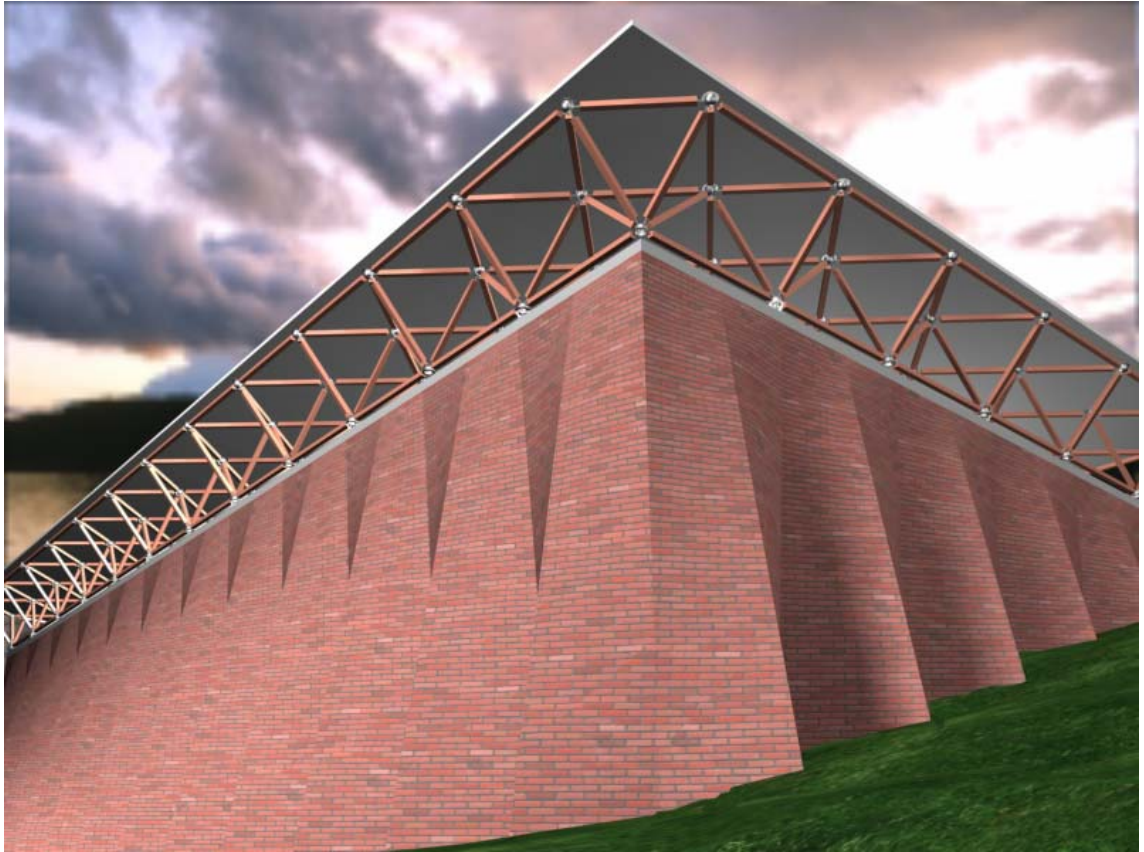


Ilustración IV-21.- Vista Exterior



Ilustración IV-22.- Detalle de apoyo en muro de fábrica

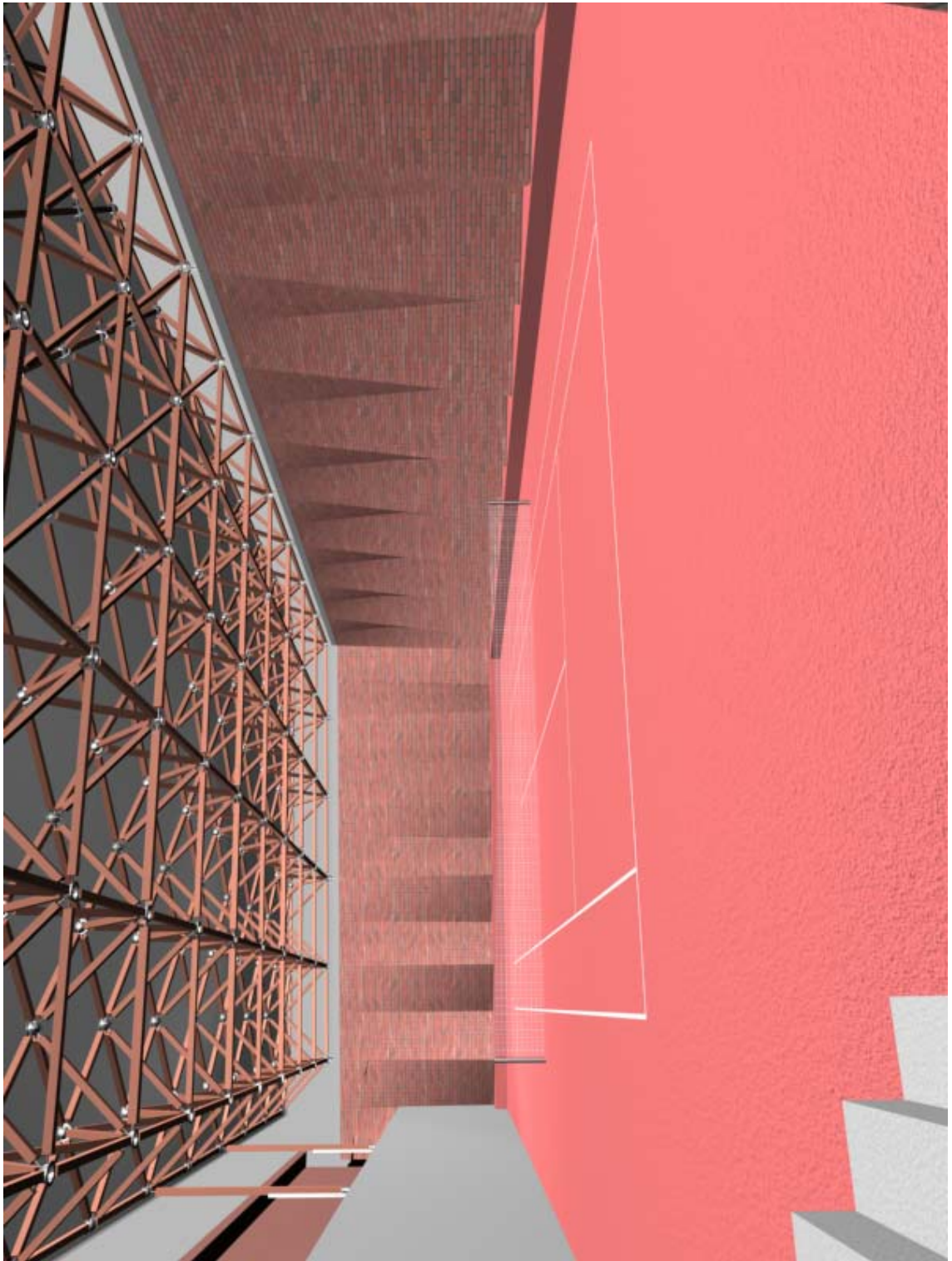


Ilustración IV-23.- Vista interior.

2.- ANÁLISIS Y DIMENSIONADO

2.1- BASES DE CÁLCULO

Los criterios generales para abordar el análisis y dimensionado de este tipo de estructuras siguen las determinaciones establecidas en la norma UNE-ENV 1995 “Proyecto de estructuras de madera”, versión española del Eurocódigo 5 y la futura NBE-EM que, prácticamente, constituye una transcripción literal de la citada norma europea.

Los efectos de las acciones sobre la estructura se evalúan mediante el método matricial considerando un modelo basado en una relación tensión-deformación lineal del material y un comportamiento elástico. Dado que los valores característicos de las propiedades de los materiales se obtienen a partir de ensayos en los que se admite una relación lineal entre la tensión y deformación hasta la rotura, la verificación de la resistencia de las piezas individuales se basará igualmente en esta relación lineal.

La fiabilidad de la estructura, en general, y de los elementos que la componen, en particular, se asegura aplicando el método de los estados límite.

2.1.1. ACCIONES

La determinación de acciones en España está regulada por la norma NBE-AE.88 “Acciones en la Edificación”. Se trata de una norma bastante antigua que, aunque fue revisada en el año 1988, permanece prácticamente invariable desde su primitiva redacción en el año 1962 como norma MV-101. Por ello, y dado que por una parte, los criterios de cálculo y dimensionado de la madera se basan en el Eurocódigo 5 y que algunos aspectos particulares de este material, como la influencia de la duración de la carga no son contemplados en la referida NBE, es interesante el manejo de la norma UNE ENV 1991 Eurocódigo 1 “Bases de proyecto y acciones en estructuras”.

Por otra parte, y dado que la finalidad de las mallas de madera es la construcción de estructuras de cubierta, únicamente se hará referencia a los aspectos de las acciones vinculadas a este tipo de uso.

En primer lugar, a lo largo de la vida útil de la estructura pueden darse cuatro posibles situaciones de cálculo:

- ❑ **Situación definitiva o persistente**, correspondiente a las condiciones normales de uso.
- ❑ **Situación transitoria**, relativa a condiciones provisionales. En el caso de las mallas, el proceso de izado de la estructura hasta su situación definitiva puede constituir una situación de cálculo de importante consideración.
- ❑ **Situación accidental**, relativa a condiciones excepcionales. En este caso, se encontraría la situación de incendio, que como se ha detallado en el capítulo II, no invalida la utilización de la madera en esta tipología de estructuras
- ❑ **Situación sísmica**.

Las acciones se clasifican, por su variación en el tiempo, en:

- ❑ **Permanentes (G)**, para las que se adopta un valor característico G_k igual a su valor nominal
- ❑ **Variables (Q)**, para las que se adopta como valor característico Q_k , referido a un período de retorno de 50 años, el correspondiente a una probabilidad de superarse de 0,02 en un año.
- ❑ **Accidentales (A)**

Dado que el tiempo de actuación de una carga tiene una apreciable incidencia en la capacidad resistente de la madera, el Eurocódigo 5 establece 5 clases de duración

CLASES DE DURACIÓN DE LA CARGA	
TIPO	DURACIÓN ACUMULADA DE LA CARGA CARACTERÍSTICA
Permanente	> 10 años
Larga duración	6 meses – 10 años
Media duración	1 semana – 6 meses
Corta duración	< 1 semana
Instantánea	Corresponde a una acción accidental

Para el caso particular de las estructuras de cubierta las posibles cargas actuantes son:

- ❑ **Cargas permanentes**
- ❑ **Sobrecarga de uso**, la correspondiente a cubiertas no accesibles. Dicha carga corresponde a la categoría H, clasificada como de corta duración. Su valor característico se establece en una carga uniformemente distribuida de $0,75 \text{ kN/m}^2$. y una puntual, no simultánea, de $1,5 \text{ kN}$ actuando en una superficie cuadrada de 50 mm. de lado. Dado que en las mallas las cargas se aplican directamente a los nudos de la estructura, el empleo de módulos con lado superior a $\sqrt{2} \text{ m.}$, como es lo habitual, hace que la acción más desfavorable sea directamente la carga uniformemente distribuida.
- ❑ **Cargas de nieve**, determinadas de acuerdo con NBE-AE.88 y consideradas asimismo como cargas de corta duración, salvo en situaciones muy singulares de emplazamiento a una gran altitud.
- ❑ **Cargas de viento**, también evaluadas según NBE-AE.88 y de duración corta.
- ❑ **Acciones sísmicas**, cuya determinación habría que realizar de acuerdo con NCS-94, y que no han sido consideradas en el presente trabajo.

En consecuencia, vemos que en el proyecto de este tipo de estructuras solamente precisamos la consideración de dos clases de duración, permanente y corta duración.

Los valores de cálculo de las acciones correspondientes a los estados límites últimos, en las situaciones de proyecto persistentes y transitorias, se obtienen de acuerdo con la expresión siguiente:

$$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Para los estados límites de servicio la normativa establece dos situaciones, de las cuales la segunda, correspondiente a combinación casi permanente, no procede su aplicación por cuanto los coeficientes de combinación correspondientes a la sobrecarga de uso en cubiertas, nieve y viento son nulos. En consecuencia, la expresión resultante será:

$$\sum G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

LEYENDA Y COEFICIENTES PARCIALES DE SEGURIDAD PARA LAS ACCIONES			
$G_{k,j}$	Valores característicos de las acciones permanentes		
$Q_{k,1}$	Valor característico de una de las acciones variables		
$Q_{k,i}$	Valor característico de las restantes acciones variables		
$\gamma_{G,j}$	Coeficiente parcial de seguridad para acciones permanentes	Efecto desfavorable	$\gamma_G = 1,35$
		Efecto favorable	$\gamma_G = 1,00$
$\gamma_{Q,1}$	Coeficiente parcial de seguridad para la acción Variable	Efecto desfavorable	$\gamma_G = 1,50$
		Efecto favorable	$\gamma_G = 0$
$\gamma_{Q,i}$	Coeficiente parcial de seguridad para las restantes acciones variables	Efecto desfavorable	$\gamma_G = 1,50$
		Efecto favorable	$\gamma_G = 0$
$\psi_{0,i}$	Coeficiente de combinación	Sobrecarga de uso en cubierta	$\psi_0 = 0$
		Nieve	$\psi_0 = 0,6$
		Viento	$\psi_0 = 0,6$

2.1.2- PROPIEDADES DEL MATERIAL

Los valores de las propiedades de resistencia, rigidez y densidad de la madera laminada encolada se determinan en función de su asignación a una clase resistente, bien mediante ensayos normalizados de acuerdo con las normas UNE-EN.408, UNE-EN.1193 y UNE-EN.1194, bien mediante deducción teórica a partir de las propiedades de las láminas de madera aserrada que conforman la pieza, aplicando las expresiones de cálculo que figuran en UNE-EN.1194.

Para la madera laminada encolada homogénea se establecen 4 clases resistentes a los que corresponden los siguientes valores de las propiedades mecánicas:

CLASES RESISTENTES			GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
Flexión	$f_{m,g,k}$	N/mm ² .	24	28	32	36
Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	N/mm ² .	16,5	19,5	22,5	26
Tracción perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	N/mm ² .	0,4	0,45	0,5	0,6
Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	N/mm ² .	24	26,5	29	31
Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	N/mm ² .	2,7	3,0	3,3	3,6
Cortante	$f_{v,g,k}$	kN/mm ² .	2,	3,2	3,8	4,3
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,medio}$	kN/mm ² .	11,6	12,6	13,7	14,7
Módulo de elasticidad paralelo percentil 5	$E_{0,g,k}$	kN/mm ² .	9,4	10,2	11,1	11,9
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,g,medio}$	kN/mm ² .	0,39	0,42	0,46	0,49
Módulo transversal medio	$G_{g,medio}$	kN/mm ² .	0,72	0,78	0,85	0,91
Densidad característica	$\rho_{g,k}$	Kg/m ³ .	380	410	430	450

Los valores característicos de las propiedades del material se ven afectados en el caso de las mallas de madera por dos factores de corrección:

Factor por altura k_h

Tiene en cuenta el efecto del tamaño de la pieza en la resistencia a tracción.

$$k_h = \left(\frac{600}{h} \right)^{0.2} \leq 1,15$$

Dado que h representa la mayor dimensión de la sección transversal en mm., puede comprobarse que hasta un valor de h = 298,31 mm., la expresión conduce a un valor de k_h superior al máximo de 1,15 establecido por la normativa. En consecuencia, dado que con barras huecas de madera difícilmente se alcanzará dicha dimensión, podemos adoptar directamente:

$$k_h = 1,15$$

Es importante señalar que todos los estudios realizados sobre el factor de altura se refieren a piezas de sección maciza, con lo que su consideración, en el caso de las barras huecas, supone la aplicación de un criterio general a un caso no contemplado específicamente y que debería ser evaluado experimentalmente. Este aspecto de hecho se plantea dentro de las posibles líneas de investigación futura.

Factor por carga compartida k_{ls}

Tiene en cuenta el efecto favorable, desde el punto de vista del comportamiento estructural, que representa la existencia de un conjunto de piezas similares con separaciones iguales, conectado transversalmente a través de un sistema continuo de distribución de carga. Dicho factor k_{ls} afecta a las resistencias a tracción y compresión y su valor viene dado por:

$$k_{ls} = 1,10$$

A partir de los valores característicos anteriores, afectados cuando proceda por los factores de corrección señalados, el valor de cálculo de una propiedad del material se establece como:

$$X_d = k_{mod} \cdot \left(\frac{X_k}{\gamma_M} \right)$$

LEYENDA Y COEFICIENTES PARA LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL					
X _d	Valor de cálculo de la propiedad del material				
X _k	Valor característico de la propiedad del material				
γ _M	Coeficiente parcial de seguridad para la propiedad del material	Estados límites últimos (Situación de proyecto persistente y transitoria)	γ _M = 1,30		
		Estados límites de servicio	γ _M = 1,00		
k _{mod}	Factor de modificación en función de la duración de la carga y de las condiciones ambientales definidas por las clases de servicio	CLASE DE DURACIÓN DE LA CARGA	CLASE DE SERVICIO		
			1	2	3
		Permanente	0,60	0,60	0,50
		Larga duración	0,70	0,70	0,55
		Media duración	0,80	0,80	0,65
		Corta duración	0,90	0,90	0,70
		Instantánea	1,10	1,10	0,90

Tal y como se observa en la tabla anterior, el factor de modificación k_{mod} de las propiedades del material depende de la clase de duración de la carga y de la clase de servicio. Las clases de servicio pretenden reflejar la incidencia de las condiciones ambientales en las propiedades resistentes del material. Se definen tres clases de servicio:

❑ **CLASE DE SERVICIO 1.**

Se caracteriza por un contenido de humedad en los materiales correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 65% unas pocas semanas al año. Estas condiciones corresponden a una humedad de equilibrio higroscópico media no superior al 12% en la mayoría de las coníferas. En esta clase de servicio se encuentran las estructuras bajo cubierta situadas en ambiente interior.

❑ **CLASE DE SERVICIO 2.**

Se caracteriza por un contenido de humedad en los materiales correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año. Estas condiciones corresponden a una humedad de equilibrio higroscópico media no superior al 20% en la mayoría de las coníferas. En esta clase de servicio se encuentran las estructuras bajo cubierta pero abiertas y expuestas al ambiente exterior y las piscinas cubiertas.

❑ **CLASE DE SERVICIO 3.**

Se caracteriza por unas condiciones ambientales que conduzcan a contenidos de humedad superiores al de la clase de servicio 2. En esta clase de servicio se encuentran las estructuras expuestas a la intemperie, en contacto con el agua o con el suelo.

Dado que en el caso particular de las mallas de madera destinadas a estructuras de cubierta únicamente les afectan dos clases de duración de carga y que las clases de servicio razonablemente serán también la 1 ó la 2, se observa en la tabla que el factor k_{mod} queda reducido a dos únicos valores, dependiendo únicamente de la clase de duración.

CLASE DE DURACIÓN DE LA CARGA	CLASE DE SERVICIO		
	1	2	3
Permanente	0,60	0,60	0,50
Larga duración	0,70	0,70	0,55
Media duración	0,80	0,80	0,65
Corta duración	0,90	0,90	0,70
Instantánea	1,10	1,10	0,90

2.2.- CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA ESPACIAL

El cálculo del conjunto del sistema estructural se ha realizado utilizando el programa matricial tridimensional desarrollado por el equipo de investigación perteneciente al Departamento de tecnología de la construcción, en el que se acepta un comportamiento elástico y lineal de los materiales.

Las barras se han representado por sus ejes suponiendo una articulación perfecta en todos los nudos de enlace en los cuales se han aplicado las cargas. Todas las acciones se ha introducido respetando de acuerdo con lo descrito en el apartado anterior, a efectos de considerar posteriormente las consiguientes hipótesis combinatorias con los oportunos coeficientes de seguridad.

A partir de la generación automática de la geometría, la aplicación deduce la matriz de rigidez de la estructura, así como las matrices de carga por hipótesis simples. Posteriormente se obtiene la matriz de rigidez por métodos frontales. Solo después de hallar los desplazamientos por hipótesis, se calculan los esfuerzos en cualquier sección a partir de los esfuerzos en lo extremos de las barras y las cargas aplicadas en las mismas.

ACCIONES DE CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA			
ACCIONES GRAVITATORIAS	PERMANENTES	Peso propio de la estructura	15 Kg./m ² .
		Correas "Ω" OF-80/2.5 + Material de cobertura	25 Kg./m ² .
	VARIABLES	Sobrecarga de uso para conservación	50 Kg./m ² .
		Sobrecarga de nieve (no simultánea con s. de uso)	50 Kg./m ² .
	CARGA TOTAL		90 Kg./m ² .
ACCIONES EÓLICAS	Se han obtenido como plano exento, lo que se traduce en dos hipótesis simples (una de presión y otra de succión) representadas por una carga triangular de valor máximo 60 Kg./m ² en el borde de barlovento.		
	No se ha considerado la acción simultánea de viento y sobrecarga de uso		

En el cálculo se han considerado una clase resistente GL28h, una clase de servicio 2, correspondiente a estructuras cubiertas y abiertas, y una clase de duración de la carga permanente para las concargas y de corta duración para la sobrecarga de nieve y la acción eólica.

Para el dimensionado de las barras de madera se han aplicado los criterios del Eurocódigo 5, dimensionando las barras a tracción excéntrica y/o compresión excéntrica para una excentricidad de valor $L/500$ siendo L la luz de la pieza. Lógicamente, en las barras comprimidas se ha considerado el oportuno coeficiente K_c de reducción al pandeo en función de la esbeltez de la pieza afectada.

La comprobación de estados límites de servicio ha arrojado los siguientes resultados, que muestran la elevada rigidez de la estructura:

Flecha instantánea de acciones permanentes	$U_{G,inst} = 17,0 \text{ mm.}$	(L/1.121)
Flecha instantánea de sobrecarga de nieve	$U_{Q,inst} = 21,2 \text{ mm.}$	(L/899)
Flecha final de acción permanente + sob. nieve	$U_{net,fin} = 51,8 \text{ mm.}$	(L/368)

Teniendo en cuenta que las limitaciones de flecha relativa recogidas en el Eurocódigo fijan unos valores máximos de $L/300$ para la flecha instantánea de acciones variables y $L/200$ para la flecha neta final, se puede observar que dichos límites se satisfacen con holgura.

En el cuadro adjunto se detallan las repercusiones de los diferentes elementos estructurales en el peso total de la estructura.

REPERCUSIÓN DE PESO PROPIO DE LA ESTRUCTURA		
MÓDULOS	Peso de madera MÓDULO TIPO 1	79,0 Kg.
	Peso de madera MÓDULO TIPO 2	83,9 Kg.
	Peso total MÓDULO TIPO 1 (madera, nudos, vástagos, tuercas, etc.)	138,0 Kg.
	Peso total MÓDULO TIPO 2 (madera, nudos, vástagos, tuercas, etc.)	144,1 Kg.
ESTRUCTURA COMPLETA	Superficie cubierta	1.003,2 m ² .
	Peso total de madera	9.009,1 Kg.
	Peso total de elementos metálicos: nudos, vástagos, tuercas, etc.	5.462,2 Kg.
	Peso total de la estructura completa	14.471,3 Kg.
%	Repercusión del peso de madera por m ² de superficie cubierta	8,98 Kg/m ² .
	Repercusión del peso total por m ² de superficie cubierta	14,43 Kg/m ² .
	Peso de elementos metálicos respecto al peso total	37,75 %

3.- EJECUCIÓN DEL PROYECTO.

Adjudicada la construcción de la cubrición y cierre de la pista polideportiva en Octubre de 2001, las obras avanzan a buen ritmo tal y como se aprecia en las ilustraciones, la cimentación esta ya prácticamente ejecutada, y se está preparando el entramado auxiliar que servirá de soporte para realizar el replanteo de los paraboloides hiperbólicos de fábrica de ladrillo.

Tanto las barras huecas de madera laminada, como los nudos de enlace de barras de acuerdo con lo expuesto en los capítulos anteriores han sido ya encargados por la empresa constructora, estimándose su montaje en obra en el plazo de cuatro meses.



Ilustración IV-24.- Estado de las obras. 24-10-2001.



Ilustración IV-25.- Estado de las obras. 12-11-2001.



Ilustración IV-26.- Estado de las obras. 12-11-2001.

V.- CONCLUSIONES. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

1.- ANTECEDENTES

Esta tesis continua la labor investigadora desarrollada en el seno del Departamento de Tecnología de la Construcción de la Universidad de la Coruña, centrándose en los siguientes aspectos básicos para la construcción de una malla espacial de madera:

En primer lugar, estudia el diseño y comportamiento estructural del enlace extremo de barra con el apoyo de una serie de campañas de ensayos experimentales, en segundo lugar resuelve el nudo de enlace de barras, tanto en lo que respecta a su generación geométrica por métodos paramétricos como a su análisis numérico por el método de los elementos finitos; por último se diseñan los elementos necesarios para la ejecución de una malla constituida por módulos semioctaédricos formados por barras huecas de madera laminada.

2.- CONCLUSIONES

Los resultados que se concluyen de la presente tesis permiten afirmar sin ningún genero de dudas que la mallas espaciales constituidas por barras huecas de madera laminada son una eficaz opción para la cubrición de grandes espacios con una calidad estética de innegable atractivo, constituyendo un sistema estructural de elevadas prestaciones, capaz de competir con las tradicionales soluciones en acero alcanzando un peso de madera comprendido entre los 9 y 12 kg/m². dependiendo de las dimensiones y los apoyos de la malla espacial.

En lo que respecta al comportamiento frente al fuego, la aplicación del método de la sección eficaz al caso de las barras de sección hueca de madera pone de manifiesto, que este no constituye una limitación a su posible utilización siendo perfectamente competitivas, desde este punto de vista, con los perfiles tubulares de acero para la construcción de estructuras ligeras de cubierta.

El reducido espesor de las paredes de las barras garantiza la estabilidad dimensional de las mismas frente a variaciones de humedad en las barras, como consecuencia de las posibles variaciones en las condiciones higrotérmicas del ambiente exterior, facilitando además los tratamientos de protección frente a agentes bióticos.

Los ensayos demostraron que el diseño de secciones huecas conformadas mediante el laminado de tablas, minimizando así las imperfecciones del material, es perfectamente válido a efectos estructurales al no producirse fallos en las líneas de encolado; es más como se observó en la segunda campaña de ensayos de compresión, la excesiva deformación del vástago metálico determinó la suspensión del ensayo.

El diseño del enlace extremo de barra reduce la superficie expuesta al fuego evitando el efecto “chimenea”, asegurando además la protección de los elementos metálicos de enlace.

Los ensayos experimentales con probetas a escala real han sido determinantes para optar por el diseño de extremo de barra constituido por paredes paralelas y taco de frondosa de sección constante.

Las campañas de ensayos demostraron que la colocación de un taco de madera frondosa de sección constante de alta densidad es una óptima solución para garantizar la transmisión de esfuerzos axiales desde el vástago metálico hasta la sección hueca de madera, descartando otras soluciones realizadas con especies coníferas como el abeto para la sección maciza dada su baja capacidad resistente.

La sección constante del taco de madera facilita la ejecución de los enlaces extremos de barra al no ser necesario el desbastado del extremo de las paredes de la barras, este diseño exigiría además una complicada ejecución manual al tener que introducir cada una de las tablas laminadas una determinada longitud en la regruessadora, para luego retirarlas manualmente.

La ejecución de la barra hueca se facilita con la disposición del taco de madera maciza de alta densidad ya que sirve como plantilla para el encolado de las caras laterales. Permitiendo además un mejor aprovechamiento de las posibilidades resistentes de la sección hueca frente a otras soluciones como los conectores chapa-clavo o los pasadores.

En lo que respecta a la transmisión de los esfuerzos axiales de compresión la colaboración de una placa rígida de sección trapezoidal, resulta imprescindible para asegurar un reparto homogéneo de tensiones sobre toda la sección del tubo de madera, en estas condiciones la eliminación de nudo macizo rebajado anula el efecto de acunamiento de soluciones anteriores, alcanzándose en los ensayos realizados valores de rotura superiores a los 210kN.

Los ensayos realizados ofrecen valores homogéneos, aún teniendo presente lo reducido de la población analizada; los valores característicos y medios obtenidos en las probetas ensayadas, son indicativos del excelente comportamiento del diseño de enlace extremo de barra.

Se plantea para la generación del modelo virtual un método basado en el diseño paramétrico del perfil generador en dos dimensiones enlazado bidireccionalmente con las herramientas de modelado de sólidos tridimensionales.

Este nuevo método implica un salto cualitativo importante a la hora de permitir la sencilla modificación del modelo 3D con un simple cambio en el perfil generador bidireccional.

La definición de los grados de libertad del perfil generador determina sus posibles variaciones de forma o de tamaño. Mediante la aplicación de restricciones geométricas y dimensionales se limitan dichos grados de libertad, de forma que los cambios que se realizan en el perfil sean compatibles con los criterios restrictivos establecidos previamente. Tras la creación del perfil paramétrico la utilización del modelado booleano resulta un método eficaz para la definición del elemento tridimensional.

Los sistemas de exportación de geometrías tridimensionales mediante el formato IGES (Initial Graphics Exchange Specification) en el que se define un formato neutral para el intercambio de información entre sistemas CAD / CAM, ha demostrado su adecuación para la implementación de geometrías complejas procedentes de programas de dibujo asistido, en programas de cálculo numérico por elementos finitos. El formato IGES comparte algunas características con el formato de intercambio DXF, como pueden ser su independencia del software y el sistema operativo utilizado, sin embargo únicamente el formato IGES soporta objetos NURBS *Non-Uniform Rational B-Splines*, las superficies NURBS se generan analíticamente, su cálculo es más eficaz que las mallas poligonales y se pueden representar sin uniones aparentes.

Se ha elaborado un archivo de intercambio con la opciones óptimas para realizar una eficiente exportación preservando la geometría y funcionalidad de las entidades iniciales en el momento de su importación a la base de datos de ANSYS.

Del cálculo matricial de la estructura espacial se obtienen las envolventes de los esfuerzos axiales que las barras de la malla transmiten al nudo de enlace. Tras el análisis numérico del nudo con diferentes espesores, se opta por un espesor de 10mm, conformado por estampación y posterior soldadura de anillo perimetral. El nudo metálico resulta eficaz frente a las solicitaciones que le transmiten las barras, la disposición del anillo perimetral rigidiza el casquete central permitiendo una importante reducción en el peso del elemento de enlace.

El inicio de la construcción de la malla espacial de barras huecas de madera en Octubre de 2001, determina un punto de inflexión en la labor investigadora ya que sin duda nos permitirá disponer de un modelo a escala real, convenientemente monitorizado, que reforzará sin duda nuestra futura labor investigadora.

3.- NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La potencialidad que ofrece el equipamiento del Centro de Investigación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil será, sin duda, un apoyo importante para la continuidad de la labor experimental.

- Los ensayos realizados han permitido la construcción de una estructura espacial de cubierta, se pretende continuar la labor desarrollada en la presente tesis con los siguientes ensayos:
 - Análisis experimental de la unión entre el vástago metálico y el taco de madera macizo, al objeto de determinar la longitud de anclaje del vástago metálico en función de la adherencia que proporciona el adhesivo empleado. Se ha alcanzado un convenio de colaboración con la empresa HILTI, para el desarrollo de esta línea investigadora en la que se realizarán ensayos con diferentes longitudes de madera, empleando diversas resinas epoxi, variando también el espesor del diámetro realizado en el taco de madera para garantizar la total penetración del adhesivo.
 - Análisis de los enlaces extremo de barra con la disposición de un zunchado en cabeza, los ensayos realizados por P. Huybers, abren una línea de investigación que pudiera ser aplicable para los diseños de extremo de barra. Este zunchado podría incrementar de forma notable la capacidad resistente de las barras.
 - Ensayos de larga duración tanto a tracción como a compresión, a efectos de conocer las deformaciones diferidas bajo este tipo de solicitaciones, ensayando en principio barras aisladas, con la intención de instrumentalizar la malla espacial que en estos momentos se está construyendo de manera que sea una continua fuente de información sobre el comportamiento de esta novedosa tipología estructural.
 - Ensayos de módulos reales, con la construcción de la malla está prevista la construcción de un primer módulo completo, se pretende instrumentalizarlo para conocer el verdadero comportamiento de todos sus componentes.
- La utilización de tableros estructurales LVL (Laminated Veneer Lumber), conformadas por chapas microlaminadas encoladas en la misma dirección, para la construcción de las tablas que conforman la barra hueca parece ser una opción de enorme futuro. Estos tableros de uso habitual en Estados Unidos y en los Países Nórdicos es prácticamente desconocido en España, sin embargo puestos en contacto con responsables de empresas del ramo de la madera, auguran un rápido incremento de su cuota de mercado.

- ❑ Una línea de investigación interesante es el estudio experimental del comportamiento frente al fuego de las barras huecas de madera, los múltiples estudios realizados se refieren siempre a secciones macizas de madera. Dada la imposibilidad de realizar los ensayos en el CITEEC, se ha suscrito un convenio de colaboración con la empresa especializada EUROQUIMICA en la búsqueda de resistencia real al fuego de las barras huecas de madera con y sin protección.
- ❑ El desarrollo de la programación orientada a objetos utilizando los nuevos métodos que aporta la generación paramétrica de modelos tridimensionales abre una línea investigadora de indudable interés.
- ❑ La vinculación obtenida entre los programas de diseño asistido y de cálculo matricial, constituye un instrumento de extraordinaria utilidad. Esta vinculación sienta las bases de una nueva línea investigadora consistente en el estudio de la interconexión posible entre programas de diseño asistido, programas de cálculo, bases de datos y programas de modelado de sólidos y visualización avanzada .
- ❑ La capacidad que aportan las curvas y superficies NURBS, creadas expresamente para el modelado 3D por ordenador, a la creación de geometrías complejas abre un vasto campo de investigación dado que estas no existían en el mundo del dibujo convencional.

- 1** Autor: AICHER,S. – HERR, J.
Título: **Investigations on high strength glulam frame corners with glued-in steel connectors.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes.1998.Vol 1. Pag. 273 – 280.
- 2** Autor: AOKI, S.
Título: **Experimental study on timber dome structure with the joint looseness.**
Editorial: Proceedings of the IASS Symposium, Copenhagen. 1991.
- 3** Autor: AOKI, S. - MATSUNO, K.
Título: **Study of long span wooden structure.**
Editorial: Proceedings of the AIJ Symposium, Hokuriku. 1992.
- 4** Autor: AOKI, S. - MATSUNO, K.
Título: **Experimental study of wooden single-layer space frame models of h.p. shape.**
Editorial: IASS - CSCE International Congress. Innovative Large Span Structures. Vol. 1, pp 657-667. 1992 .
- 5** Autor: ARGÜELLES, R – ARRIAGA, F.
Título: **Estructuras de madera. Diseño y cálculo.**
Editorial: Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho. AITIM. Madrid. 1996 .
- 6** Autor: ARGÜELLES ÁLVAREZ, R. Y OTROS
Título: **Curso de construcción en madera. Estructuras mixtas, rehabilitación, y carpintería.**
Editorial: Servicio de Publicaciones del Colegio oficial de arquitectos de Madrid.1988.
- 7** Autor: BAN, S.
Título: **Experimental studies on a long-span wooden dome.**
Editorial: Proceedings of the IASS Symposium. 1991.
- 8** Autor: BARBISAN, H. –LANER, F.
Título: **I solai in legno.**
Editorial: Francoangeli. 1995.

- 9** Autor: BATHE, K.J.
Título: **Finite element procedures in engineering analysis.**
Editorial: Prentice – Hall. Englewood Cliffs. New Jersey, 1981.
- 10** Autor: BEER, H. – SCHULZ, G.
Título: **Bases théoriques des courbes européennes de flambement.**
Editorial: Construction métallique, nº3. Paris. 1970.
- 11** Autor: BETTINA HORSCH – KURT SCHWANER
Título: **Brücken aus Holz.**
Editorial: Lignum. 1999.
- 12** Autor: BLASS, H.J.
Título: **Strength model for glulam columns.**
Editorial: Proceedings of the Joint Meeting. CIB W18/IUFRO S 5.02.
Paper 19-12-2. Firenze. Italy. 1986.
- 13** Autor: BLASS, H.J.
Título: **Design of timber columns.**
Editorial: Proceedings of the CIB W18 Meeting. Paper 20-2-2. Dublin.
Ireland. 1987.
- 14** Autor: BLASS, H.J.
Título: **The influence of creep and duration of load on the design of timber columns.**
Editorial: Proceedings of the International Conference on Timber Engineering. Seattle. USA. 1988.
- 15** Autor: BLASS, H.J.
Título: **Columns.**
Editorial: Timber Engineering STEP 1. Centrum Hout. Holanda. 1995.
- 16** Autor: BLASS, H.J.
Título: **Toothed-plate connector joints.**
Editorial: Timber Engineering STEP 1. Centrum Hout. Holanda. 1995.
- 17** Autor: BREYER, D.
Título: **Design of wood structures.**
Editorial: McGraw-Hill, Inc. 1993.

- 18** Autor: CAIRONI, M. – BONERA, L.
Título: **Il legno lamellare. Il calcolo.**
Editorial: Habitat Legno. Edolo. Brescia. 1989.
- 19** Autor: CASTRO VILLALBA, A.
Título: **Historia de la construcción arquitectónica.**
Editorial: Edicions Universitat Politècnica de Catalunya. 1995.
- 20** Autor: CHILTON, J.
Título: **Space grid structures.**
Editorial: Architectural Press. Gran Bretaña. 2000.
- 21** Autor: CHRISTIAN MÜLLER
Título: **Holzleimbau. Laminated timber construction.**
Editorial: Birkhäuser. 2000
- 22** Autor: DATY, K. R. – GORE, N.
Título: **Innovative designs of wood-bamboo-brick composites.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 1. Pag. 526 – 533.
- 23** Autor: DÁVALOS, J. F. – PETRO, H. – SALIM, A.
Título: **Effective width for stress-laminated timber bridge decks.**
Editorial: Proceedings of the IASS International Symposium Spatial Structures: Heritage, Present and Future. Vol. 2, pp. 1373-1380. 1995.
- 24** Autor: DENG, J. – MOSS, P. J. – BUCHANANM A.
Título: **Glued bolts in glulam – analysis of stress distribution.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 2. Pag. 206 – 213.
- 25** Autor: DESAI, C. S.; ABEL, J.F.
Título: **Analysis.**
Editorial: Van Nostrand Reinhold. New York, 1972.

- 26** Autor: EEKHOUT, M.
Título: **Architecture in Space Structures.**
Editorial: Uitgeverij 010 publishers. 1989.
- 27** Autor: EEKHOUT, M.
Título: **Las estructuras tubulares en arquitectura.**
Editorial: CIDECT.
- 28** Autor: ELLIOT, STEVEN – MILLER, PHILIP
Título: **Incide 3d Studio Max**
Editorial: Prentice Hall,
- 29** Autor: ESCRIG, F. - VALCÁRCEL, J.
Título: **Modular space frame structures.**
Editorial: Space Structures 4. Thomas Telford, London, 1993. Fourth International Conference on Space Structures, Vol. 2, pp. 1997-2006. Surrey. 1993.
- 30** Autor: ESTÉVEZ, J. - PABLOS, J. - VÁZQUEZ, R.
Título: **Double-layer space structures of laminated timber tubular members.**
Editorial: Space Structures 4. Thomas Telford, London, 1993. Fourth International Conference on Space Structures, Vol. 1, pp. 563-572. Surrey. 1993.
- 31** Autor: ESTÉVEZ, J. - PABLOS, J. - VÁZQUEZ, R.
Título: **Mallas espaciales de doble capa en madera laminada.**
Editorial: Boletín de Información Técnica del AITIM, nº167, Nov-Dic. 1993 Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho, Madrid. 1993.
- 32** Autor: ESTEVEZ, J. - PABLOS, J. - MARTIN, E.
Título: **Maras 96.**
Editorial: Second International Conference on Mobile and Rapidly Assembled Structures. pp. 191-200. 1996.

- 33** Autor: ESTEVEZ, J. - MARTIN, E. - PABLOS, J. – VÁZQUEZ, J.A.
Título: **Estructuras espaciales modulares y apilables de tubos de madera laminada.**
Editorial: Boletín de Información Técnica del CIS-Madera nº 0, Dic. 1997. pp. 41-46 Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la madera, Orense. 1997.
- 34** Autor: ESTEVEZ, J. – ARRIAGA, F.
Título: **La futura norma básica de estructuras de madera.**
Editorial: Boletín de Información Técnica del CIS-Madera nº 5, 2º Semestre 2000. Pág. 42-48 Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la madera, Orense. 2000.
- 35** Autor: ESTEVEZ, J. - PABLOS, J. – VÁZQUEZ, J.A. – MUÑIZ, S.
Título: **Innovative stackable wooden space 3d trusses.**
Editorial: Het Houtblad nº 5 , Septiembre 2001, Almere. Holanda.2001.
- 36** Autor: FERNÁNDEZ TROYANO, L.
Título: **Tierra sobre el agua. Visión histórica universal de los puentes.**
Editorial: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos. Colección de ciencias, humanidades e ingeniería nº55. 1999.
- 37** Autor: FERNÁNDEZ VILLEGAS, F. – ECHENIQUE MANRIQUE,R.
Título: **Estructuras de madera.**
Editorial: Editorial Limusa. 1989.
- 38** Autor: FOLIENTE, G.C
Título: **Evolution of structural timber use.**
Editorial: Proceedings of the IASS International Symposium Spatial Structures: Heritage, Present and Future. Vol. 2, pp. 1381- 1388. 1995.
- 39** Autor: FURRER, P. – SHARP, J.
Título: **Efficient structural use of modern wood composites.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 1. Pag. 55 – 61.

- 40** Autor: GAUNT, J.
Título: **Joints in glulam using groups of epoxy grouted steel bars plus an alternative to epoxy bonding.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 1. pp. 281 – 288.
- 41** Autor: GHAVAMI, K.
Título: **Application of bamboo as a low cost construction material.**
Editorial: Proceedings of the International Bamboo Workshop. pp. 270-279. Canadá. 1990.
- 42** Autor: GHAVAMI, K.
Título: **Bambu: um material alternativo na engenharia.**
Editorial: Revista Engenharia, Pub. Engenho Editora Técnica Ltda, nº 492, pp. 23-27. 1992.
- 43** Autor: GHAVAMI, K. - MOREIRA, L.E.
Título: **Bamboo space structures.**
Editorial: Proceedings of the International Symposium on Industrial Use of Bamboo. Pp. 199-209. Beijing, China.1992.
- 44** Autor: GHAVAMI, K. - MOREIRA, L.E.
Título: **Double-layer bamboo space structures.**
Editorial: Space Structures 4. Thomas Telford, London, 1993.Fourth International Conference on Space Structures. Vol. 1, pp. 573-581. Surrey. 1993.
- 45** Autor: GHAVAMI, K. - MOREIRA, L.E.
Título: **Development of a new joint for bamboo space structures.**
Editorial: MARAS 96. Second International Conference on Mobile and Rapidly Assembled Structures. pp. 201-210. 1996.
- 46** Autor: GALLUZZI PAOLO
Título: **Gli ingegneri del rinascimento da Brunelleschi a Leonardo da Vinci.**
Editorial: Giunti. 1996.

- 47** Autor: GONZALEZ TAZCÓN, I. Y OTROS
Título: **Betancourt. Los inicios de la ingeniería moderna en Europa.**
Editorial: Ministerio de Obras Publicas, Transportes y Medio Ambiente. 1996.
- 48** Autor: GÖTZ, K. – HOOR, D. – MOLER, K. – NATTERER, J.
Título: **Construire en bois.**
Editorial: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne. 1993.
- 49** Autor: GUAN, Z.
Título: **Structural behaviour of glued bolt joints using FRP.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 1. pp. 265 – 272.
- 50** Autor: GUIDONI, E.
Título: **Arquitectura primitiva.**
Editorial: Aguilar S.A. de ediciones. 1977.
- 51** Autor: GUSTAFSSON, J. – SERRANO, E.
Título: **Glued truss joints analysed by fracture mechanics.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 1. pp. 257 – 264.
- 52** Autor: HANGAI, Y. - KONDOH, K. - ODA, K. - OHYA, S.
Título: **Load carrying test of a wood lattice dome for expo'90 Osaka.**
Editorial: IASS - CSCE International Congress 1992. Innovative Large Span Structures. Vol. 1, pp. 648-656. 1992.
- 53** Autor: HANSEN, H.J.
Título: **Architecture in wood:a history of wood building and its techniques in europe and North America.**
Editorial: The Viking Press, Inc., New York, USA. 1971.
- 54** Autor: HARTL, H.
Título: **Behaviour of timber and wood-based materials in fire.**
Editorial: Timber Engineering. STEP 1. Centrum Hout. Holanda. 1995.

- 55** Autor: HARTL, H.
Título: **Fire resistance of timber members.**
Editorial: Timber Engineering. STEP 1. Centrum Hout. Holanda. 1995.
- 56** Autor: HERZOG, T.
Título: **Roof structure.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 2. pp. 375 – 376.
- 57** Autor: HILSON, B.O.
Título: **Joints with dowel-type fasteners.**
Editorial: Timber Engineering STEP 1. Centrum Hout. Holanda. 1995.
- 58** Autor: HOLZER, S. M. – TONGTOE S.
Título: **Finite element analysis of a glulam dome.**
Editorial: Proceedings of the IASS International Symposium 1995 Spatial Structures: Heritage, Present and Future. Vol. 2, pp. 1365-1372 1995.
- 59** Autor: HOUTMAN, R., – GROOT, J. W. P. – VAN DER ENDE, G .
Título: **Maximun strength of wire-laced dowel joints for roundwood.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 2. pp. 161 – 168.
- 60** Autor: HUYBERS, P.
Título: **Wire binding technique for building structures of roundwood.**
Editorial: International Conference on the Design and Construction of Non-conventional Structures. London. 1987.
- 61** Autor: HUYBERS, P.
Título: **The use of roundwood and bamboo for structural building applications.**
Editorial: Proceedings of the IASS International Symposium 1995 Spatial Structures: Heritage, Present and Future. Vol. 2, pp. 1389- 1396 1995.

- 62** Autor: ISHII, K.
Título: **Structural design of retractable roof structures.**
Editorial: WIT - press. 2000.
- 63** Autor: JANSEN, J.J.A.
Título: **Building with Bamboo.**
Editorial: ITDG Publising. 1995.
- 64** Autor: LANER, F.
Título: **Il legno lamellare. Il progetto.**
Editorial: Habitat Legno. Edolo. Brescia. 1989.
- 65** Autor: LES PIEGL - WAYNE TILLER
Título: **The NURBS Book**
Editorial: New York: Springer, 2ªed. 1997
- 66** Autor: LINKWITZ
Título: **Two examples of integrated formfinding and numerically controlled premanufacturing: the tunber shekks if bad neuenahr 1993 and maulbronn 1995.**
Editorial: Proceedings of the IASS International Symposium Spatial Structures: Heritage, Present and Future. Vol. 2, pp. 1397– 1406. 1995.
- 67** Autor: LOFERSKI, J.R. - DOLAN, J.D.
Título: **Structural wood products for spatial structures.**
Editorial: Proceedings of the IASS International Symposium 1995 Spatial Structures: Heritage, Present and Future. Vol 2, pp 1407-1412 1995.
- 68** Autor: MAKOWSKI, Z.S.
Título: **Analysis, design and construction of double-layer grids.**
Editorial: Applied Science Publishers, London. 1981.
- 69** Autor: MAKOWSKI, Z.S.
Título: **Space structures - a review of the developments within the last decade.**
Editorial: Space Structures 4. Thomas Telford, London, 1993. Fourth International Conference on Space Structures. Vol. 1, pp. 1-8. Surrey. 1993.

- 70** Autor: MARGARIT, J. – BUXADÉ, C.
Título: **Las mallas espaciales en arquitectura.**
Editorial: Editorial Gustavo Gili, Barcelona.
- 71** Autor: MATSUNO, K. - AOKI, S.
Título: **Experimental study on a wooden single-layer space frame of e.p. shell on a rectangular plan.**
Editorial: IASS-MSU Symposium. Public Assembly Structures from Antiquity to Present. Vol. 1, pp. 623-632. 1993.
- 72** Autor: MATSUNO, K. - AOKI, S.
Título: **Experimental study on a buckling behavior of a wooden single-layer space frame of reticular shell on a hexagonal plan.**
Editorial: Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium 1994Spatial, Lattice and Tension Structures. pp. 152-161. 1994.
- 73** Autor: MATSUNO, K. - AOKI, S. - SUZUKI, E.
Título: **Structural design & construction method for a wooden single-layer space frame of reticular shell.**
Editorial: Proceedings of the IASS International Symposium 1995Spatial Structures: Heritage, Present and Future. Vol. 2, pp. 1413-1420. 1995.
- 74** Autor: MEDWADOWSKI, S.J.
Título: **Moderns spatial wood structures in the United States.**
Editorial: Bulletin of the IASS, Vol. XXII-2, pp. 13-25. 1985.
- 75** Autor: MEDWADOWSKI, S.J.
Título: **Aesthetics of wood structures.**
Editorial: Bulletin of the IASS, Vol. XXVI-2, pp. 31-50. 1985.
- 76** Autor: MILLER, PHILIP
Título: **3D Studio Max 3**
Editorial: Prentice Hall, 2000.

- 77** Autor: MORLIER, P.
Título: **DOL effect on different sized and shaped timber beams.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 2. pp. 340 – 347.
- 78** Autor: MÜLLER, C.
Título: **Laminated timber construction.**
Editorial: Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference. Gold Coast, Australia. Vol. 3, pp. 11-19. 1994.
- 79** Autor: NATTERER, J.
Título: **Lightweight structures in timber.**
Editorial: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne 1994.
- 80** Autor: NATTERER, J.
Título: **Lightweight structures in timber.**
Editorial: Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference. Gold Coast, Australia. Vol 3, pp 11-19. 1994.
- 81** Autor: NATTERER, J.
Título: **Tendencies en bridge construction.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 2. pp. 100 – 107.
- 82** Autor: NATTERER, J.
Título: **Space and shell structures in timber.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 2. Pag. 377.
- 83** Autor: NATTERER, J. – HERZOG, T. – VOLZ, M.
Título: **Construire en bois 2.**
Editorial: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne 1994.

- 84** Autor: OMURA, GEORGE
Título: **AutoCAD 2000**
Editorial: Anaya Multimedia, 2000.
- 85** Autor: PABLOS, J. - ESTÉVEZ, J. - VÁZQUEZ, J.
Título: **Modular dimensioning of stackable 3d trusses made of tubular timber bars.**
Editorial: 40th Anninversary Congress of the IASSShells and spatial structures: from recent to the next millennium. CEDEX. Madrid1999.
- 86** Autor: PERAZA, C. ET ALLÍ
Título: **Estructuras de Madera.**
Editorial: Escuela de la Edificación, C. O. De Aparejadores, Madrid. 1992.
- 87** Autor: PERRIN, J.P. – QUOST, D.. – BOCQUET, J.F.. – RACHER, P. . – BIGER, J.P.
Título: **The pavilion of utopia.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 2. Pag. 80 – 87.
- 88** Autor: RIBERHOLT, H.
Título: **Glued bols in glulam – proposal for cib code.**
Editorial: Proceedings of the CIB-W18 Meeting. Parksvill. Vancouver Island. Canada. Pp. 21-7-2. 1988.
- 89** Autor: RILEY, G. – GEBREMEDHIN, K. G.
Título: **Effective resístanse of joints with múltiple fastenings MR Hirai, Mr Ohtomo, Mr Wakashima. Axial and rotational stiffness model of metal-plate-connected wood truss joints.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering, edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et universitaires romandes. 1998. Vol 2. Pag. 153 – 160.
- 90** Autor: RODRÍGUEZ NEVADO, M.A.
Título: **Diseño estructural en madera. Una aproximación en imágenes al estado del arte europeo a finales del siglo XX.**
Editorial: Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho. AITIM. Madrid.1999.

- 91** Autor: RODRÍGUEZ NEVADO, M.A. – SÁNCHEZ MARCOS, M.M
Título: **Diseño estructural en madera.**
Editorial: Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho. AITIM. Madrid. 1999.
- 92** Autor: RONDAL, J. – MAQUOI, R.
Título: **Formulatiuons d'ayrton-perry pour le flambement des barres métalliques.**
Editorial: Construction métallique, n°4. Paris. 1979.
- 93** Autor: RUDDOCK, T.
Título: **Arch bridges and their builders.**
Editorial: Cambridge university press. 1979.
- 94** Autor: SAKAMOTO, I.
Título: **Wooden spatial structures in japan.**
Editorial: Bulletin of the IASS, Vol. 33, pp 109-119. 1992.
- 95** Autor: SÁNCHEZ MAZAIIRA, A.
Título: **La madera laminada encolada.**
Editorial: Fundación Escuela de Edificación (Colegio Oficial de Aparejadores y A. T. de Madrid). 1992.
- 96** Autor: SÁNCHEZ SÁNCHEZ, J.
Título: **Estructuras desplegables de aspas para mallas poliédricas curvas. Tesis Doctoral.**
Editorial: Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Departamento de Mecánica de los medios Continuos y Teoría de Estructuras. 1996.
- 97** Autor: SEDLAK, V.
Título: **The use of lightweight timber structures in architecture.**
Editorial: Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference. Gold Coast, Australia. Vol 1, pp. 102- 111. 1994.
- 98** Autor: SEDLAK, V.
Título: **Lightweight timber structures - an international survey.**
Editorial: Proceedings of the IASS International Symposium 1995Spatial Structures: Heritage, Present and Future. Vol. 2, pp. 1421-1434. 1995.

- 99** Autor: SLUIS, E. W. P. – GROOT, J. W. P. – VAN DER ENDE, G.
Título: **The block shear joint, a new joint for roundwood structures.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering,
edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et
universitaires romandes.1998. Vol 2. pp. 268 – 275.
- 100** Autor: TORROJA MIRET, E.
Título: **Razón y ser de los tipos estructurales.**
Editorial: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Insituto de
Ciencias de la Construcción “ Eduardo Torroja “, Madrid, 1991.
- 101** Autor: TULLY, D.
Título: **Timber structures**
Editorial: Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium
1994Spatial, Lattice and Tension Structures. pp. 97-102. 1994.
- 102** Autor: VARIOS
Título: **Tectónica 11. Madera 1.**
Editorial: ATC ediciones. 2000.
- 103** Autor: VÁZQUEZ DE LA CUEVA, A. Y OTROS
Título: **La ingeniería civil en la pintura.**
Editorial: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos. Colección
de ciencias, humanidades e ingeniería N° 61. 1984.
- 104** Autor: VIVES, A.
Título: **Construction of two timber spatial shells structures.**
Editorial: Proceedings of the IASS Symposium 1989.
- 105** Autor: WHALE, L.R.J.
Título: **Punched metal plate fastener joints.**
Editorial: Timber Engineering. STEP 1. Centrum Hout. Holanda.1995.
- 106** Autor: WINGERDEN, P. – HUYBERS, P.
Título: **Theoretical and experimental research on connections for a
roundwod observation tower structure.**
Editorial: Proceedings of the IASS International SymposiumSpatial
Structures: Heritage, Present and Future. Vol. 2, pp. 1435-1443
1995.

- 107** Autor: YOUNG, B.W.
Título: **Axially loaded steel columns.**
Editorial: Cambridge University, Technical Report
CUED/C – TRUCT/TR.11.1971.
- 108** Autor: YOUNGS, R.L.
Título: **History of timber use.**
Editorial: Concise Encyclopedia of Wood and Wood-Bases Materials.
The M.I.T Press, Cambridge, MA, USA 1989.
- 109** Autor: YOUNGS, S. – CLANCY, P.
Título: **Degradation of mechanical properties en compression of radiata pine in fire.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering,
edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et
universitaires romandes. 1998. Vol 1. pp. 246 – 253.
- 110** Autor: ZVEREV, V. – CHERNYSHEV, E.
Título: **Wood surface modifying with silicones.**
Editorial: Proceedings of the 5th world conference on timber engineering,
edited by J. Natterer and J.-L. Sandoz. Presses polytechniques et
universitaires romandes.1998. Vol 1. pp. 254 – 256.
- 111** Autor: ZWERGER, K.
Título: **Wood and wood joints.**
Editorial: Birkhauser verlag ag. 1997.

Fé de erratas

Se han detectado los siguientes errores derivados de la impresión digital del documento

Pag. 199

En lugar de ¡Error! Imposible crear objetos modificando códigos de campo

Debería figurar $\sqrt{2}$

Pag. 203

En lugar de ¡Error! Imposible crear objetos modificando códigos de campo

Debería figurar $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$